

NÚMERO MONOGRÁFICO

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Noviembre 2014 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Una historia familiar de 7 millones de años

EVOLUCIÓN
La saga humana

PENSAMIENTO SIMBÓLICO
La importancia de la cultura

CAMBIOS CLIMÁTICOS
Motores de la evolución

FUNCIONES DE LA TRIBU
La crianza cooperativa

EVOLUCIÓN PRESENTE
El impacto de la tecnología



6,50 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

EVOLUCIÓN LA SAGA HUMANA

NOVIEMBRE 2014 N.° 458

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Noviembre 2014, Número 458

EVOLUCIÓN
La saga humana

16 Reescribir la evolución
Nuevos hallazgos obligan a revisar nuestra historia evolutiva. *Por Kate Wong*

20 DE DÓNDE VENIMOS

22 Nuestro intrincado árbol genealógico
Los últimos análisis señalan que la evolución humana es mucho más enrevesada de lo que imaginábamos. *Por Bernard Wood*

28 Cambios climáticos y evolución humana
La alternancia entre paisajes húmedos y secos favoreció que algunos de nuestros ancestros adoptaran rasgos más modernos y que otros se extinguieran. *Por Peter B. deMenocal*

34 A golpe de suerte
El éxito de nuestros antepasados no se debió solo a su capacidad para fabricar herramientas. La suerte también desempeñó un papel decisivo. *Por Ian Tattersall*

46 QUÉ NOS HACE ESPECIALES

48 Ventajas evolutivas de la monogamia
Emparejarse tal vez fue la mejor decisión que pudieron tomar nuestros ancestros. *Por Blake Edgar*

54 Raíces del espíritu cooperativo
La predisposición a cooperar en sociedades de gran tamaño tiene un origen evolutivo remoto. *Por Frans de Waal*

58 La pequeña gran diferencia
La capacidad para involucrarnos en tareas comunes complejas podría haber sido lo que nos separó del resto de los primates. *Por Gary Stix*

66 La receta humana de la crianza
En nuestra forma de alimentar y proporcionar cuidados a los retoños hallamos rasgos procedentes de los primates y otros que ha ido incorporando el linaje evolutivo. *Por Ana Mateos*

74 ADÓNDE NOS DIRIGIMOS

76 El primate interconectado
Sherry Turkle, socióloga del Instituto de Tecnología de Massachusetts, opina que permanecer siempre conectados está mermando nuestras capacidades sociales. *Entrevista por Mark Fischetti*

80 El futuro de la evolución humana
Durante los últimos 30.000 años nuestra especie ha experimentado cambios notables y rápidos, un proceso que todavía continúa. *Por John Hawks*



INGO ARNDT, GETTY IMAGES


7


44


86

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

3 **Cartas de los lectores**

4 **Apuntes**
El renacimiento de los aviones de hélice. El telescopio de rayos cósmicos EUSO levanta cabeza. En el estudio de audición. ¿Qué camino lleva a casa?

7 **Agenda**

8 **Panorama**
Las raíces de los neandertales. *Por Carlos Lorenzo*
¿Púlsares o materia oscura? *Por Manuel Aguilar Benítez de Lugo*
El horizonte visible de las matemáticas. *Por Ágata Timón García-Longoria y David Fernández*
Una diferencia mínima, pero notable. *Por Kate Wong*

40 **De cerca**
La reproducción del pulpo.
Por Jorge Hernández Urcera y Ángel Guerra

42 **Filosofía de la ciencia**
Ciencia y sentido común, ¿adversarios o aliados?
Por Ambrosio Velasco Gómez

44 **Foro científico**
El derecho a la ciencia.
Por Mikel Mancisidor

86 **Taller y laboratorio**
Creación de una polimeroteca.
Por Marc Boada

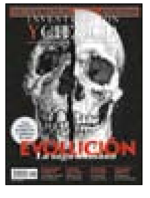
90 **Juegos matemáticos**
Lenguaje, convenciones y coordinación.
Por Alejandro Pérez Carballo

92 **Libros**
Simbiosis. *Por Luis Alonso*
Bohr. *Por Luis Alonso*

96 **Hace...**
50, 100 y 150 años.

EN PORTADA

La andadura evolutiva del linaje humano comenzó hace siete millones de años. Hasta hace poco, los investigadores creían conocer bien ese proceso. Sin embargo, los avances de los últimos años en paleoantropología, genética, climatología o psicología han trazado un panorama de la evolución humana mucho más rico de lo que se pensaba. Este número monográfico repasa el pasado, presente y futuro de una especie y una disciplina que siguen evolucionando. Ilustración de Katy Wiedemann.



redaccion@investigacionyciencia.es



Septiembre 2014

FALSOS NEGATIVOS

En «Máquinas pensantes» [por María Cerezo; Investigación y Ciencia, septiembre de 2014] se efectúa un acertado análisis sobre las implicaciones del test de Turing, aunque solo desde una perspectiva de falsos positivos. En mi opinión, el principal argumento contra el test de Turing debería partir de la certeza de que conduciría, de manera inevitable, a un elevado número de falsos negativos.

Al basarse en la capacidad para mantener una conversación «inteligente», el test encierra un fuerte sesgo antropocéntrico y cultural. Toda conversación, por genérica que parezca, tiene un sustrato directamente vinculado a la experiencia, el entorno y la forma de percibirlo. Requiere un contexto común entre los sujetos que dialogan, ya que, en caso contrario, estos nunca podrían entenderse.

Frente al falso positivo del ejemplo de la habitación china, cabe considerar el seguro falso negativo que obtendríamos al enfrentar en el test de Turing a un aborigen de Nueva Guinea y a estudiantes del Instituto de Tecnología de Massachusetts. No existiría el más mínimo sustrato común sobre el que conversar, lo que daría lugar a un inevitable negativo. Se trata de un sesgo similar al de los primeros tests de inteligencia efectuados en EE.UU., donde los inmigrantes obtenían sistemáticamente resultados muy bajos, o el mismo por el que los Estados coloniales afirmaban que los pueblos colonizados adolecían de una inteligencia inferior.

Si nos planteásemos usar el test de Turing para detectar inteligencia extraterrestre, aceptando que otras formas de vida podrían poseer capacidades sensoriales diferentes, desarrollarse en entornos distintos y dar lugar a culturas materiales diversas, estaríamos condenados al fracaso. Entre un humano y un ser inteligente que, en lugar de sentido de la vista, dispusiera de uno para detectar ondas eléctricas como el que tienen los tiburones, existirían diferencias de percepción tan fundamentales que prácticamente sería imposible entablar una conversación.

Javier López Parada
Zamora

Responde Cerezo: *En su artículo «Computing machinery and intelligence», Turing concibió su test como un juego de imitación con dos interlocutores: una máquina (A) y un humano (B), así como un interrogador (C). El objetivo consistía en que A se hiciera pasar por B y consiguiese engañar a C, siendo además la misión de B ayudar a C a acertar la respuesta. (El test original contemplaba que un varón engañara al interrogador haciéndose pasar por mujer, si bien tales detalles resultan aquí irrelevantes.)*

Así formulado, el test admite varias consideraciones. Primero, que está pensado para generar, precisamente, falsos positivos. Y, en realidad, a todo falso positivo va asociado un falso negativo, ya que una respuesta errónea por parte del interrogador conllevaría el juicio de que B no es humano. Estos son los falsos negativos directamente relevantes para el test de Turing, entendido como una prueba destinada a determinar si las máquinas piensan o no.

En segundo lugar, el test presupone —en el artículo original, de manera tácita— que el humano (B) y el interrogador (C) pertenecen a la misma cultura y que la máquina intentará hacerse pasar por un miembro de ella. Si A contestara a C que no habla su idioma, C deduciría de inmediato que el humano es B. En sentido estricto, las interesantes situaciones que plantea el lector corresponden a casos en los que el test como tal no podría implementarse, más que a aquellos en los que arrojaría falsos negativos.

En la medida en que la motivación del test consiste en sustituir la pregunta de si las máquinas piensan o no por otra más tratable (¿pueden engañar a un humano en el juego de imitación?), la prueba está planteada como un criterio de inteligencia. Y la pregunta filosófica que surge en este contexto es si el test de Turing ofrece condiciones suficientes para la atribución de inteligencia, no si tales condiciones son necesarias. Esta última es la cuestión sobre la que, acertadamente, llama la atención el lector.

En su artículo, el propio Turing llegó a plantearse dicho inconveniente al señalar que, tal vez, las máquinas fuesen capaces de desarrollar tareas muy distintas de las humanas que, sin embargo, podrían también ser descritas como pensamiento. Así pues, Turing era consciente de los límites de su test y de que este podía ofrecer falsos negativos, en el sentido apuntado por el lector, para el caso mismo de las máquinas. Sin embargo, dejaba de lado esta objeción —que, por cierto, juzgaba poderosa— al indicar que bastaría con construir un aparato capaz de superar el juego de imitación para responder de manera afirmativa a la pregunta de si las máquinas pueden pensar o no.

El lector acierta, por tanto, al señalar el sesgo antropocéntrico del test de Turing. Si bien se trata de un aspecto menos discutido, varios trabajos han concluido que esta famosa prueba no garantiza la atribución de inteligencia sin más, sino de inteligencia humana orientada culturalmente.

Errata corrige

En la reseña **Estructuras del universo** [por L. Alonso; *IyC*, septiembre de 2014] se dice que la gran explosión tuvo lugar hace unos 10.000 millones de años. En su lugar debería leerse unos 14.000 millones de años.

Como indica nuestro lector Pedro Manuel Mejías, en el artículo **Verdades resbaladizas** [por H. Joachim Schlichting; *IyC*, octubre de 2014], la fuerza que ejerce el patinador en el ejemplo de la página 84 no es de 80 newtons, sino de 800 (la presión resultante que se indica en el texto, 8 millones de pascales, sí es correcta).

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LOS INGENIEROS de Dowty Propellers emplean trenzadoras para construir palas de hélice avanzadas.

CORTESÍA DE DOWTY PROPELLERS

INGENIERÍA

El renacimiento de los aviones de hélice

Hace un siglo, la aparición de las aeronaves de hélice dio un enorme impulso a la tecnología aeronáutica. Tras la Segunda Guerra Mundial, sin embargo, la economía inclinó la balanza del lado de los aviones más rápidos y capaces de cubrir largas distancias, por lo que la investigación se centró en los reactores. Así, mientras la técnica de los turboventiladores avanzaba a buen paso, las hélices se quedaron prácticamente donde estaban.

Esa situación podría cambiar dentro de poco. El encarecimiento del combustible y el aumento de la demanda de vuelos cortos durante los últimos diez años ha provocado que las líneas aéreas recuperen su interés por los aviones más pequeños y eficientes. Ante tales perspectivas, los ingenieros han vuelto sobre los desfasados motores turbohélice. Se espera que, a finales de esta década, una nueva generación de aviones de hélice vea la luz.

Según un estudio de mercado del fabricante canadiense Bombardier, las aeronaves impulsadas por turbohélices sumaron cerca de la mitad de los aviones de pasajeros de entre 20 y 99 asientos entregados en 2013, una paridad que no se daba desde los años noventa. Ese aumento de la demanda se debe a que, para vuelos de menos de 900 kilómetros, los motores turbohélice aprovechan mucho mejor el combustible que los turboventiladores, los cuales solo alcanzan su máxima eficiencia en altitudes de crucero. Sin embargo, ese buen rendimiento viene a expensas de una menor velocidad de vuelo y un ruido y vibraciones incómodos para los pasajeros. Las aerolíneas, que compiten por el precio tanto como por una experiencia de vuelo agradable —y que son conscientes de que los pasajeros perciben los aviones de hélice como antiguallas—, no se contentarán con los motores turbohélice del siglo pasado.

Entre quienes están desbrozando el camino para una nueva generación de turbohélices se encuentra Dowty Propellers, de General Electric Aviation. Sus ingenieros están estudiando con nuevas herramientas la interacción entre la hélice, la góndola del motor y las alas de la nave. Gracias a los avances computacionales en dinámica de fluidos, los científicos de la compañía de Gloucester no solo están diseñando palas cuya forma incrementa la eficiencia, sino reconsiderando la disposición de la hélice en su conjunto.

«La diferencia radica en la potencia de cálculo de la que disponemos hoy», explica Jonathan Chesteney, de Dowty. Ahora, los datos de cada pala pueden analizarse por separado. «Podemos ver muchos más detalles. Es como un científico que mira por primera vez a través de un microscopio», ejemplifica.

Los ingenieros de Dowty han explorado dos nuevas técnicas para espaciar las hélices de ocho palas. Una las coloca de manera desigual alrededor del cubo de la hélice; la otra las escalona siguiendo un eje, con cuatro de ellas situadas por delante del resto. Tales disposiciones modifican las frecuencias audibles que se generan durante el vuelo. La compañía ya ha comenzado a reclutar voluntarios para que experimenten el ruido que se produce en la cabina y decidir cuáles prefieren.

Dowty no está sola en esta clase de estudios. Según el ingeniero aeronáutico Lakshmi Sankar, del Instituto de Tecnología de Georgia, la siguiente generación de helicópteros encargada por el Departamento de Defensa de EE.UU. también requerirá hélices avanzadas, al igual que los próximos vehículos aéreos no tripulados. La investigación en dinámica de fluidos computacional llevada a cabo por el Centro de Investigaciones Glenn de la NASA y por el Instituto de Tecnología de Georgia se está aplicando ya a los diseños de algunos proveedores; entre ellos, Dowty y UTC Aerospace Systems, en Carolina del Norte.

No falta mucho para que los nuevos diseños lleguen a la pista de despegue. «Creemos que en los próximos años algunos fabricantes clave sacarán a luz nuevas aeronaves», vaticina Chestney.

—Clay Dillow

STEPHEN ROUNTREE

ESPACIO

El telescopio de rayos cósmicos EUSO levanta cabeza

Los rayos cósmicos viajan a velocidades muy próximas a la de la luz y bombardean la Tierra desde todas direcciones. Las partículas con carga eléctrica son las componentes de mayor energía de estos rayos. Pero, tras años de estudios, los expertos siguen sin saber de dónde vienen.

Se cree que los rayos cósmicos de alta energía pudieron partir de agujeros negros supermasivos hospedados en galaxias lejanas o, tal vez, de partículas que se desintegraron poco después de la gran explosión. Sea cual sea su origen, los más energéticos chocan contra la atmósfera terrestre al ritmo de una vez por kilómetro cuadrado y siglo. El impacto produce una cascada de decenas de miles de millones de partículas secundarias que, a su vez, colisionan contra las moléculas de nitrógeno de la atmósfera. Esa interacción genera una fluorescencia ultravioleta que ilumina el recorrido de la cascada. A partir de ella, los científicos intentan reconstruir la dirección y energía de los rayos incidentes a fin de rastrear su origen.

No es fácil ver esos sucesos extremos. Las observaciones efectuadas desde tierra solo captan las colisiones que ocurren justo encima del detector. El Observatorio Pierre Auger, en Argentina, que alberga el mayor detector de rayos cósmicos del mundo y que cubre una superficie de unos 3000 kilómetros cuadrados, registra una veintena de cascadas al año.

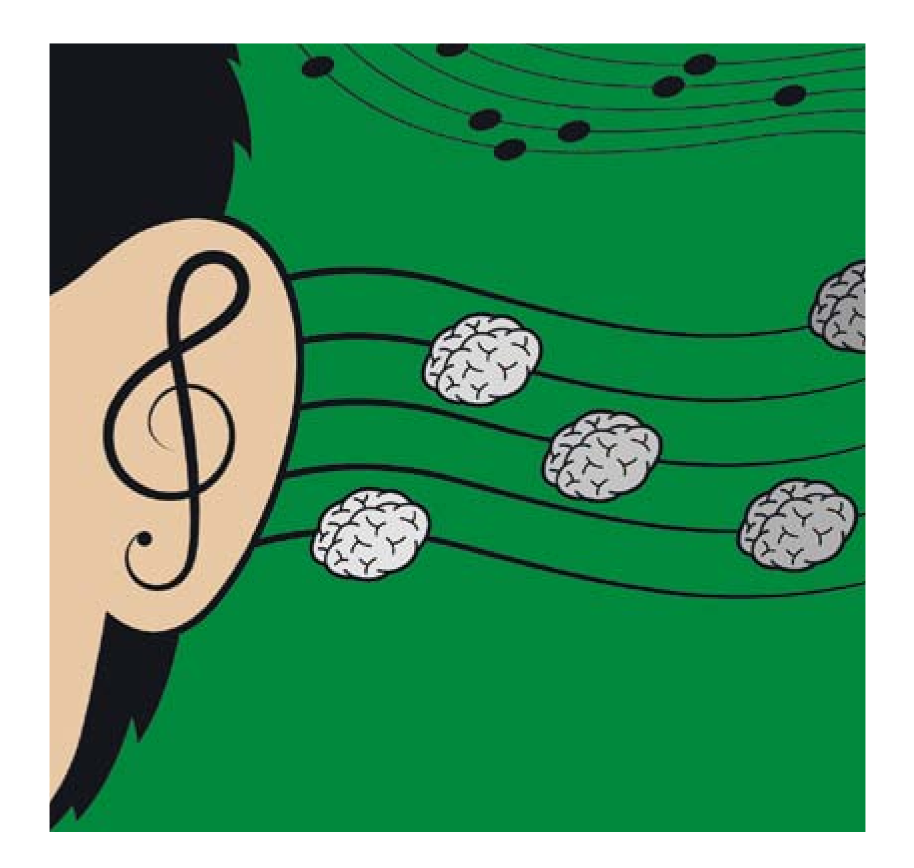
Hace más de una década, un equipo internacional diseñó un telescopio de rayos cósmicos que debía ser instalado en el módulo japonés de la Estación Espacial Internacional: el Observatorio Espacial del Universo Extremo (JEM-EUSO). El dispositivo registraría las emisiones ultravioletas con una cámara de gran angular y alta velocidad que apuntaría hacia la Tierra. Al cubrir un área de observación muy extensa, detectaría un mayor número de cascadas atmosféricas.

Sus responsables esperaban lanzar el EUSO en 2006. Sin embargo, una sucesión de problemas de muy distinta índole (el desastre de la lanzadera espacial Columbia en 2003, el accidente de Fukushima en 2011 y, ahora, el conflicto en Ucrania) han retrasado la puesta en órbita del instrumento hasta, al menos, 2018.

ENSAYO del prototipo del telescopio de rayos cósmicos EUSO efectuado en Ontario el pasado verano.

Con todo, los aspectos científicos del proyecto siguen en marcha. El pasado mes de agosto, el equipo montó un prototipo del telescopio en un globo de helio y lo llevó a 38 kilómetros de altitud. Durante dos horas, los investigadores lo siguieron desde un helicóptero y dispararon luz láser y luz LED ultravioleta hacia el ángulo visual del aparato. El ensayo concluyó con éxito: el prototipo detectó las señales, semejantes a la fluorescencia generada por las cascadas atmosféricas de rayos cósmicos. En 2016, un grupo de astronautas llevará a la Estación Espacial Internacional otro prototipo, Mini-EUSO, del tamaño de una caja de zapatos. Con ello esperan poder comprobar si el diseño funciona correctamente a la altitud que alcanzará la misión auténtica.

—Debra Weiner



COGNICIÓN

En el estudio de audición

La música ejerce una profunda influencia en las personas. Numerosas investigaciones atestiguan su hondo impacto en el comportamiento y la cognición a todas las edades. Una nueva sala de conciertos-laboratorio será la primera instalación destinada ex profeso al estudio del efecto de la música en el cerebro. El Gran Laboratorio del Entorno Virtual Interactivo (LIVElab, por sus siglas en inglés) de la Universidad McMaster en Hamilton, Ontario, inaugurado este otoño, será un espacio abierto para que neurocientíficos, fisiólogos y psicólogos sometan a prueba sus hipótesis acerca de la interpretación, la dinámica de la audiencia y la improvisación musical. Ya hay lista de espera para tocar en la sala, que cuenta con un aforo de 96 butacas.

—Katharine Gammon



EFECTO HERMANADOR

Todas las culturas del mundo conocen la música; esa es una de las razones por la que los antropólogos la consideran un rasgo definitorio de la humanidad. E interpretar música con otros influye en nuestra percepción del prójimo: se ha demostrado que las personas que experimentan juntas la música son más proclives a considerar a sus colaboradores como valiosos o agradables. Para descubrir más sobre el efecto de la música en los grupos, los investigadores del LIVElab analizarán las emociones durante las actuaciones mediante la electroencefalografía (EEG), monitores de frecuencia cardíaca y sensores para la respiración y el sudor. También recurrirán a cámaras infrarrojas captadoras de movimientos para observar el modo en que estos se contagian entre las personas, como cuando el balanceo de la cabeza se extiende entre los oyentes.



LA ACÚSTICA DEL APRENDIZAJE

¿Es mejor para el cerebro trabajar en un cubículo? ¿Ayuda a retener información el runrún de la cafetería? Por medio de EEG y de las respuestas conductuales de los estudiantes, los científicos del LIVElab analizarán los factores acústicos que influyen en un entorno de aprendizaje.



MEJORES AUDÍFONOS

Los audífonos no suelen probarse en condiciones de ruido. El LIVElab dispondrá de un sistema acústico activo (dotado de 75 altavoces y 28 micrófonos) para sumir la sala en un silencio de ultratumba o en el bullicio de un restaurante, entre otros escenarios, y analizará las prestaciones de los modelos de audífonos en condiciones diversas.



AHORA, TODOS A LA VEZ

Otra cuestión de interés es cómo se sincronizan los cerebros sin mediación de la comunicación verbal y cómo logran corregir los errores con la velocidad del rayo. Por medio de EEG y la captura de movimientos, los investigadores del LIVElab pretenden estudiar la coordinación de los músicos durante la interpretación de una pieza musical o la sincronización de los bailarines a la hora de ejecutar un paso importante.

THOMAS FUCHS

LAS RUTAS migratorias del zorzalito de Swainson están condicionadas por los genes heredados.



BIOLOGÍA

¿Qué camino lleva a casa?

Cada otoño, las aves migratorias del hemisferio norte vuelan hacia el sur para burlar el frío. Si los humanos tuviéramos que emprender semejante viaje necesitaríamos un mapa. Pero todos los pájaros guardan la ruta grabada, cuando menos en parte, en sus genes. En lugar de confiar solamente en indicadores externos, poseen un plan de vuelo innato.

La mayoría de los individuos de cada población siguen la misma ruta aprovechando los vientos favorables y la topografía más propicia. Pero algunas aves son híbridas: los progenitores proceden de poblaciones distintas y, por tanto, siguen derroteros diferentes. ¿Cómo escogen el camino sus descendientes en tales casos?

Experimentos pioneros parecían indicar que los mestizos toman una ruta intermedia respecto a las de sus padres. Las pruebas se llevaron a cabo con aves criadas en cautividad cuyas preferencias se analizaron en una jaula diseñada para registrar la dirección en la que querían volar. «Estos estudios fueron fantásticos en su día, pero lo que necesitamos ahora es seguir aves silvestres todo el año», explica Kira Delmore, graduada de la Universidad de Columbia Británica.

Delmore y sus colaboradores instalaron minúsculos dispositivos de seguimiento por GPS en 97 ejemplares silvestres de zorzalito de Swainson (*Catharus ustulatus*). Algunos pertenecían a una subespecie que vuela bordeando la costa occidental de América del Norte para invernar en México, Guatemala y Honduras. Otros, a una subespecie continental que atraviesa el centro-este del continente norteamericano hasta Colombia y Venezuela. Los híbridos del grupo nacieron en una pequeña zona donde concurren las dos poblaciones, en las montañas de la costa oeste de Canadá.

El equipo pudo recuperar datos útiles de 21 zorzalitos y comprobó que algunos híbridos tomaban rutas intermedias, lo que confirma los resultados obtenidos en el laboratorio. Otros, en cambio, adoptaron una solución de compromiso: seguir el itinerario de uno de los progenitores en primavera y el del otro en otoño. Y un último grupo se ciñó a la ruta de uno de ambos progenitores. Curiosamente, algunos de los híbridos que tomaron rutas intermedias también concluyeron la migración en destinos intermedios. «Es el primer trabajo que demuestra que tanto el itinerario como el destino de los híbridos puede ser intermedio», asegura Bridget J. Stutchbury, ornitóloga de la Universidad de York en Toronto. El estudio se publicó en octubre en *Ecology Letters*.

Delmore sospecha que los híbridos pueden mostrar más dificultades para sobrevivir porque sus rutas sobrevuelan regiones áridas y montañosas del suroeste de Norteamérica. Será necesario otro estudio de seguimiento para confirmarlo, pero de ser así, las rutas migratorias podrían constituir un mecanismo determinante de especiación en las aves. Si los zorzalitos híbridos tienen problemas para llegar a buen puerto, las poblaciones costera y continental podrían acabar convirtiéndose en dos especies distintas.

—Jason G. Goldman

STEVE GETTLE/GETTY IMAGES (*zorzalito de Swainson*); GONDWANA STUDIOS (*esqueletos*)

AGENDA

CONFERENCIAS

13 de noviembre
Evaluación del riesgo ambiental del *fracking*: Els Ports de Morella
Xavier Querol, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua
Universidad Politécnica de Valencia
Ciclo «75 años del CSIC»
www.75aniversariocsic.com

24 de noviembre
¿Tiene que haber límites a la ingeniería genética?
Núria Terribas, abogada y experta en bioética
Biblioteca Sagrada Familia
Barcelona
Ciclo «Visiones de la ciencia»
www.bcn.cat/biblioteques > Actividades

EXPOSICIONES

Momias, testigos del pasado
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com

Eureka! Ciencia y creatividad
Museo Casa de la Ciencia
Sevilla
http://eurekaciencia.org

La eclosión del pasado: Huevos y crías de dinosaurios
Espacio Cultura
Fundación Sabadell 1859
Sabadell
www.icp.cat



OTROS

3 y 4 de noviembre
Matemáticas: átomos, células, diamantes y corazones
Celebración del ingenio de Martin Gardner
Facultad de Matemáticas
Universidad Complutense de Madrid
sites.google.com/site/g4gmadrid

Semanas de la ciencia
setmanaciencia.fundaciorecerca.cat
www.madrimasd.org/semanaciencia/2014
semanadelaciencia.fundaciondescubre.es
www.cienciacanaria.es/semanas

PALEOANTROPOLOGÍA

Las raíces de los neandertales

El estudio de 17 cráneos fósiles del yacimiento de la Sima de los Huesos, en Burgos, hace replantear la evolución de los humanos europeos del Pleistoceno medio hacia los neandertales

CARLOS LORENZO

La Sima de los Huesos, situada en el conjunto arqueológico de la sierra de Atapuerca, es un yacimiento excepcional por numerosas razones. Resulta habitual que en las cuevas se realicen hallazgos arqueológicos, pero pocos sitios son tan recónditos como este. A más de 500 metros del acceso exterior más próximo, se llega a esta parte de la cueva Mayor tras descender por una sima vertical de 13 metros y una rampa de 30 grados. La Sima de los Huesos, una pequeña cámara de 6 metros de largo por 3 de ancho, conserva la mayor acumulación de fósiles humanos de todo el mundo.

Hace poco se ha publicado un estudio en *Science*, con la participación de nuestro equipo, en el que se analizan los 17 cráneos recuperados hasta la fecha y se ofrecen nuevos datos sobre su antigüedad. Algunos de los cráneos ya se habían desenterrado en los años 90, pero ahora se aportan datos de siete nuevos. Los fósiles habían sido asignados a la especie *Homo heidelbergensis*, antepasada directa de los neandertales, pero, a la vista de la reciente investigación, esta atribución debe ser reevaluada.

Los primeros fósiles humanos de la Sima se descubrieron en 1976, pero hasta mediados de los años ochenta no se iniciaron las excavaciones sistemáticas. Los años iniciales fueron muy laboriosos y conllevaron la evacuación de todo el sedimento removido por las visitas de aficionados a esta parte de la cueva Mayor. En aquel momento era difícil imaginar lo que aparecería después, pero entre el sedimento se recuperaron numerosos dientes humanos, pequeños fragmentos de cráneos y también huesos del esqueleto. Aunque los restos estaban muy fragmentados, la presencia de ciertas partes anatómicas, como las falanges de los dedos de los pies, constituía un hecho poco habitual en otros yacimientos y apuntaban a la posibilidad de que quizá se habrían acumulado esqueletos enteros. El futuro lo confirmó: en la década de los noventa se empezó a excavar el depósito no removido y los hallazgos se sucedieron. En 1992 se encontraron tres cráneos, un descubrimiento que ocupó la portada de la revista *Nature*; desde entonces se les ha destinado un lugar preeminente en todos los manuales de evolución humana.

Durante todos estos años, las excavaciones han continuado de forma ininterrumpida y se han recuperado numerosos restos que permiten seguir reconstruyendo nuevos cráneos. En la actualidad, la colección suma más de 6000 fósiles humanos que representan todas las partes del esqueleto de unos 30 individuos y los trabajos en el yacimiento todavía prosiguen.



EL CRÁNEO NÚMERO 17 DE LA SIMA DE LOS HUESOS es el último de los reconstruidos a partir de numerosos fragmentos y uno de los más completos de la colección. Su rostro y dentadura se asemejaban a los de los neandertales, pero aún conservaban rasgos de los humanos más primitivos, como la forma de la parte posterior.

CORTESÍA DE JAVIER TRUEBA

Un mosaico de características

Desde el descubrimiento de los primeros cráneos en 1992, nuestro equipo ha realizado numerosos estudios sobre distintos aspectos de estos humanos. En primer lugar, su morfología permitió saber a qué especie pertenecían y cómo se relacionaban con otras especies humanas. Además, sus capacidades acústicas indicaban que disponían de un lenguaje complejo; el dimorfismo sexual o las diferencias entre hombres y mujeres eran similares a las que tenemos en la actualidad; algunos individuos padecieron diferentes enfermedades, etcétera.

En el artículo publicado en *Science* se analizan todos los 17 cráneos recuperados desde el año 1992. Esta cantidad de fósiles permite abordar cuestiones que son inimaginables cuando solo se dispone de elementos aislados, como la distribución de ciertos rasgos en la población; en el trabajo se evalúan las similitudes y diferencias entre los distintos individuos.

La primera aportación del estudio tiene que ver con la datación del yacimiento. Conocer la antigüedad de los fósiles resulta fundamental para ubicarlos en nuestro árbol de familia, aunque no siempre es una tarea fácil. Los restos de la Sima son demasiado antiguos para poder aplicar el conocido método del carbono 14. Para averiguar la edad de los cráneos se ha empleado una combinación de diferentes técnicas que incluyen métodos físico-químicos (paleomagnetismo, óptico-luminiscencia,

electroespín) y el estudio de las especies de animales que vivieron y fosilizaron junto a los humanos (biocronología). La combinación de los diferentes datos permite precisar la fecha en que se acumularon hace unos 430.000 años, prácticamente en la mitad del período geológico denominado Pleistoceno medio (hace entre 780.000 y 128.000 años).

La segunda aportación hace referencia a las características anatómicas de los cráneos de la Sima y a la relación que guardan con las de los neandertales. Conocer la variabilidad de la población de este yacimiento nos ofrece información de cómo surgieron los neandertales. Los humanos de la Sima vivieron en una época anterior a la aparición de estos en Europa, y en los cráneos se observan algunos rasgos anatómicos comunes que permiten relacionarlos con ellos. Sin embargo, las características «de neandertal» no aparecen de la misma forma en todos los individuos ni en todas las regiones del cráneo. Los fósiles de la Sima presentan un mosaico de rasgos. En concreto, la cara proyectada hacia adelante y la morfología de la mandíbula son muy similares a las de los neandertales; en cambio, la forma de la parte posterior del cráneo es diferente.

Tales particularidades hacen pensar que la evolución de los humanos europeos del Pleistoceno medio hacia los neandertales no consistió simplemente en un proceso de adición gradual de rasgos con el que fueron volviéndose cada vez más neandertales. Los datos indican que la evolución fue más compleja de lo que pensábamos y quizá no todas las poblaciones del Pleistoceno medio en Europa se hallaban igual de emparentadas con los neandertales.

Los hallazgos también hacen cuestionarnos si todos los humanos europeos de esa época deben ampararse bajo el mismo nombre. En las últimas décadas se había optado por utilizar la especie *Homo heidelbergensis* para designar a todo el grupo, pero los datos recientes de la Sima y la necesidad de nuevas dataciones y estudios en otros yacimientos nos obliga a replantearnos si puede haber más de una especie y si deberíamos designarlas con diferentes nombres. Esta idea vendría reforzada por los resultados de la secuenciación del ADN mitocondrial de fósiles de la Sima de los Huesos, publicados hace menos de un año; tal secuencia genética, en lugar de asemejarse a la de los neandertales, se aproximaba más a la de una enigmática población de Asia central conocida como los denisovanos.

Aunque hemos aprendido mucho de este registro fósil único, su abundancia y completitud también hace que el número de preguntas que surgen resulte inagotable. El estudio de los fósiles de Atapuerca ocupará a los paleoantropólogos durante décadas y cada una de las respuestas nos permitirá aproximarnos a cómo eran y cómo vivieron estos humanos de hace casi medio millón de años.

—*Carlos Lorenzo*
Instituto Catalán de Paleoecología Humana y Evolución Social
Universidad Rovira i Virgili

PARA SABER MÁS

Three new human skulls from the Sima de los Huesos Middle Pleistocene site in Sierra de Atapuerca, Spain. J. L. Arsuaga et al. en *Nature*, vol. 362, págs. 534-537, 1993.

A mitochondrial genome sequence of a hominin from Sima de los Huesos. M. Meyer et al. en *Nature*, vol. 505, págs. 403-406, 2013.

Neandertal roots: Cranial and chronological evidence from Sima de los Huesos. J. L. Arsuaga et al. en *Science*, vol. 344, págs. 1358-1363, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los yacimientos de Atapuerca. Emiliano Aguirre en *IyC*, octubre de 1995.

¿Quiénes fueron los neandertales? Kate Wong en *IyC*, junio de 2000.

ASTROPARTÍCULAS

¿Púlsares o materia oscura?

El experimento espacial AMS detecta un enigmático exceso de electrones y positrones en los rayos cósmicos

MANUEL AGUILAR BENÍTEZ DE LUGO

Más de cien años después del descubrimiento de los rayos cósmicos, su estudio sigue despertando un gran interés entre físicos de partículas, astrofísicos y cosmólogos. Son numerosas las preguntas que aún quedan por responder acerca de estas partículas de alta energía que llegan a la Tierra desde todas las direcciones del espacio. ¿Cuál es su misterioso origen? ¿Qué composición presentan en función de su energía? ¿Qué mecanismos las aceleran y propagan por la galaxia? ¿Tienen algunas de ellas una procedencia extragaláctica?

Una de las iniciativas más recientes y ambiciosas para estudiar la radiación cósmica ha sido la puesta en marcha del Espectrómetro Magnético Alpha (AMS), un detector de partículas que opera desde 2011 en la Estación Espacial Internacional. Producto de una colaboración entre la NASA, el CERN e instituciones de 15 países, entre las que se encuentran el CIEMAT y el Instituto de Astrofísica de Canarias, su objetivo consiste en analizar la composición de los rayos cósmicos en un entorno libre de las complicaciones debidas a la atmósfera terrestre.

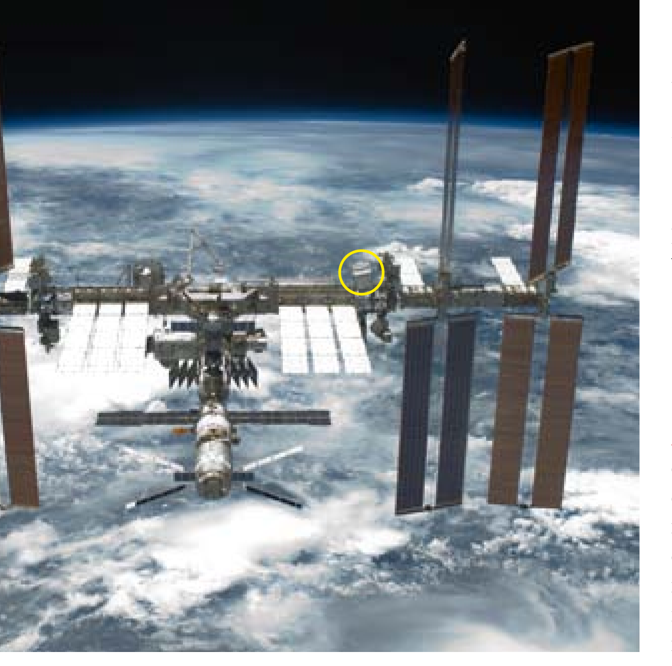
El pasado mes de septiembre, la colaboración AMS anunció nuevos datos sobre la fracción de electrones y positrones presentes en esta radiación. Los resultados, que aparecieron publicados en *Physical Review Letters*, muestran un exceso de partículas incompatible con los modelos teóricos al uso. Una de las posibilidades más interesantes es que dicho exceso se deba a la materia oscura, la misteriosa sustancia que da cuenta del 85 por ciento de toda la materia existente en el universo, pero cuya naturaleza el modelo estándar de la física de partículas no logra explicar. No obstante, otros modelos también viables contemplan fuentes de naturaleza astrofísica.

Fuentes desconocidas

El AMS es un detector de partículas de 5 × 4 × 3 metros cúbicos y 7,5 toneladas de peso. Con 300.000 canales electrónicos y 650 microprocesadores, se trata de un dispositivo similar a los empleados en los aceleradores de partículas pero adaptado al exigente entorno espacial. Aparte de las limitaciones obvias de peso, suministro eléctrico y ancho de banda, su diseño debe permitirle soportar elevadas dosis de radiación, el impacto de micrometeoritos y acusados ciclos térmicos, así como las condiciones de microgravedad y alto vacío que imperan en el espacio. Todo ello sin posibilidades prácticas de reparar componentes defectuosos o mejorar sus prestaciones, lo que exige un alto grado de fiabilidad y redundancia en los elementos críticos.

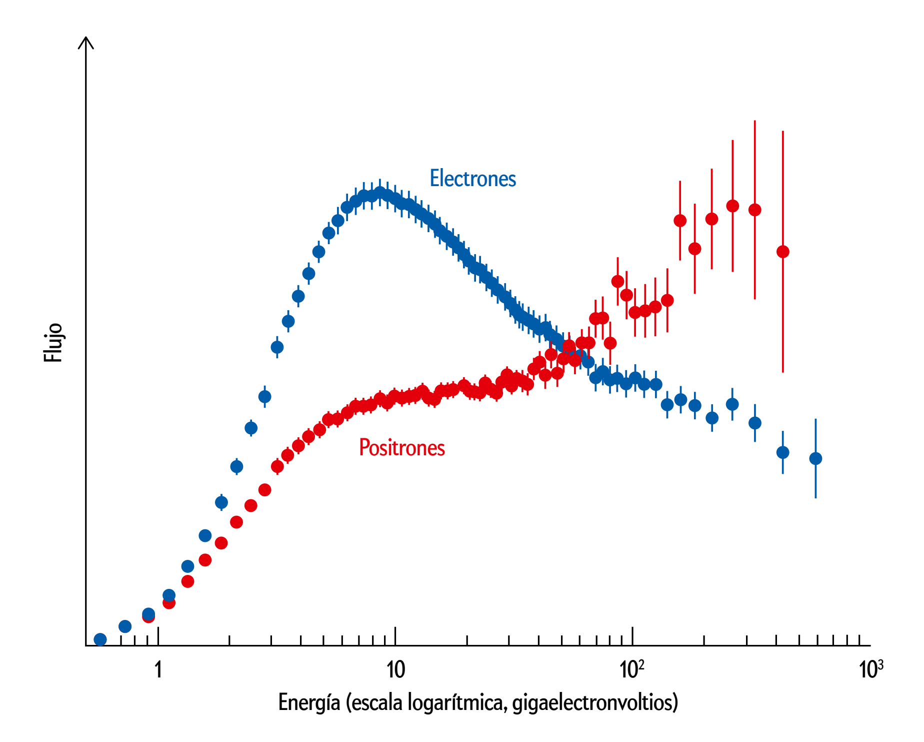
El instrumento fue enviado al espacio el 16 de mayo de 2011 a bordo del transbordador espacial *Endeavour*, en la que fue la penúltima misión de este tipo de aeronaves. Tres días después de su lanzamiento se posicionó con éxito en la Estación Espacial Internacional, que orbita a unos 350 kilómetros de altitud con una velocidad próxima a los 30.000 kilómetros por hora. Desde entonces, el AMS ha registrado información sobre unos 54.000 millones de rayos cósmicos: muchos más que todos los que se han medido desde 1912, año en que Victor F. Hess descubrió este tipo de radiación [*véase* «Un siglo de rayos cósmicos», por Michael Friedlander; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2012].

La rayos cósmicos están formados en su mayor parte por protones. Una pequeña fracción, sin embargo, se compone de electrones y sus homólogos de antimateria, los positrones. Tras analizar en detalle una primera muestra de 41.000 millones de rayos cósmicos, hemos identificado 10,9 millones de electrones y positrones. El estudio de su flujo en función de la energía ha revelado que la fracción de positrones (relativa al flujo total de electrones más positrones) aumenta con la energía y alcanza un máximo en torno a 280 GeV, valor a partir del cual comienza a decrecer.



A BORDO: El Espectrómetro Magnético Alpha (*círculo amarillo*) fue instalado en 2011 en la Estación Espacial Internacional (ISS) para medir desde allí la composición de los rayos cósmicos. Esta imagen de la ISS fue tomada el 31 de mayo de 2011, pocos días después de la inserción del instrumento.

NASA



ORIGEN INCIERTO: De un total de 41.000 millones de rayos cósmicos analizados hasta el momento, el Espectrómetro Magnético Alpha ha identificado unos 11 millones de electrones y positrones. Al estudiar el comportamiento de sus respectivos flujos (*representados aquí a escalas diferentes*) con respecto a la energía, los investigadores han observado que el número de positrones crece hasta alcanzar un máximo en torno a los 280 gigaelectronvoltios (GeV): un comportamiento inesperado que apunta a una fuente cósmica de electrones y positrones hasta ahora desconocida.

Esta evolución, unida a la diferente dependencia energética que muestran los flujos de electrones y positrones, sugiere la existencia de una fuente de positrones hasta ahora desconocida. De hecho, las distribuciones medidas (la fracción de positrones, el flujo individual de electrones y positrones, y su flujo combinado) pueden parametrizarse de forma sencilla si suponemos que los flujos individuales surgen como una suma de dos contribuciones: un espectro difuso que sigue una ley de potencias, diferente para electrones y positrones, y un término fuente, común para ambos tipos de partículas. Dicha parametrización no solo reproduce de manera correcta las distribuciones obtenidas hasta ahora, sino que confirma la necesidad de incluir un término fuente. Este, además, da cuenta de la mayor parte del flujo de positrones.

Por ahora, sin embargo, los datos disponibles no permiten establecer con precisión cómo se comportará la fracción de positrones a energías elevadas, una región que en estos momentos reviste el máximo interés. Por otro lado, las partículas parecen llegar por igual desde todas las direcciones del espacio y no se han detectado máximos estacionales, lo que impide extraer conclusiones definitivas sobre la naturaleza de las fuentes.

Modelos flexibles

Uno de los mecanismos más atractivos para explicar las distribuciones obtenidas es la aniquilación de partículas de materia oscura. Numerosos modelos predicen que, al colisionar entre sí, estas podrían aniquilarse y producir partículas ordinarias, como electrones y positrones. Por desgracia, al introducir en los cálculos los valores de las secciones eficaces considerados «canónicos», las frecuencias de aniquilación resultan demasiado exiguas para explicar la magnitud del exceso de positrones.

Otra posibilidad reside en que los positrones procedan de púlsares distribuidos por la galaxia. Un púlsar es una estrella de neutrones que rota a gran velocidad y que posee un campo magnético muy intenso, por lo que en su entorno se dan las condiciones propicias para generar y acelerar partículas. De hecho, a partir del catálogo de púlsares ATNF, elaborado por el Telescopio Nacional Australiano, resulta posible reproducir las distribuciones registradas por el instrumento AMS.

No obstante, nuestro conocimiento de la física de generación de positrones en púlsares es parcial, como también lo es el del número y la tipología de púlsares que podrían contribuir al exceso de positrones observado. Al igual que ocurre con los modelos de materia oscura, hay una gran flexibilidad predictiva. Así pues, y a la vista de todas estas incertidumbres, habremos de esperar a obtener datos estadísticamente más precisos en la región de alta energía para decidir entre las diferentes posibilidades.

La colaboración AMS tiene previsto continuar la toma de datos hasta la desorbitación de la Estación Espacial Internacional, que no se espera que se produzca antes de 2025. En ese tiempo, el instrumento podría llegar a registrar del orden de 200.000 millones de rayos cósmicos. Sin duda, ello contribuirá a entender mejor la naturaleza de la materia oscura.

Desde los años treinta del pasado siglo, los rayos cósmicos han desempeñado un papel esencial en el desarrollo de la física subatómica. Gracias a ellos se descubrió la primera partícula de antimateria, el positrón, así como el muon, el pion y los hadrones extraños. Puede que, dentro de unos años, esta radiación cósmica de origen incierto contribuya a desentrañar otras cuestiones físicas fundamentales, como la naturaleza de materia oscura, la aparente ausencia de antimateria cósmica primaria o la posible existencia de nuevas formas de materia.

—Manuel Aguilar Benítez de Lugo
Grupo AMS
Departamento de investigación básica
CIEMAT, Madrid

PARA SABER MÁS

High statistics measurement of the positron fraction in primary cosmic rays of 0.5–500 GeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station. Colaboración AMS en *Physical Review Letters*, vol. 113, art. n.º 121101, 18 de septiembre de 2014.

Electron and positron fluxes in primary cosmic rays measured with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station. Colaboración AMS en *Physical Review Letters*, vol. 113, art. n.º 121102, 18 de septiembre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Un detector de partículas en el espacio. Manuel Aguilar Benítez de Lugo en *IyC*, junio de 2011.

MATEMÁTICAS

El horizonte visible de las matemáticas

Crónica del último Congreso Internacional de Matemáticos y entrega de las medallas Fields

ÁGATA TIMÓN GARCÍA-LONGORIA Y DAVID FERNÁNDEZ

En 1900, durante el segundo Congreso Internacional de Matemáticos, celebrado en París, David Hilbert enunció su famosa lista de problemas sin resolver: 23 cuestiones que acabarían ejerciendo una enorme influencia sobre el desarrollo de las matemáticas del siglo xx. Aunque difuminada por un siglo de especialización en la investigación matemática, esa capacidad de anticipación sigue aportándola cada cuatro años el Congreso Internacional de Matemáticos (ICM). En él se comparten los grandes avances de la disciplina, se consagran las contribuciones más importantes y se reconocen las corrientes investigadoras con mayor proyección.

El pasado mes de agosto se celebró en Seúl la 27.ª edición del encuentro. Desde allí pudimos vislumbrar el horizonte próximo de las matemáticas: una ciencia en la que cada vez participarán más mujeres e investigadores de latitudes consideradas hasta ahora periféricas, en la que los límites entre subdisciplinas seguirán desdibujándose, y en la que el trasvase a otros campos del conocimiento, la industria y la sociedad desempeñará un papel clave. Los enfoques sencillos ayudarán a desenredar una maraña de ideas cada vez más compleja, la cual continuará nutriéndose de ramas clásicas, como los sistemas dinámicos y la teoría de números. Al mismo tiempo, grandes estructuras conceptuales, como el programa de Langlands, prometen unificar áreas que se creían independientes y cambiar para siempre nuestra visión de la matemática.

El ICM constituye también el escenario de entrega de las medallas Fields. Otorgadas cada cuatro años por la Unión Matemática Internacional (IMU) a investigadores jóvenes, estos galardones representan para muchos el máximo honor que puede recibir un matemático.

En la pasada edición del ICM se vivió un acontecimiento histórico: por primera vez en los 78 años de las condecoraciones, esta fue otorgada a una mujer. Maryam Mirzakhani, de Stanford, obtuvo el premio por sus contribuciones al estudio de las superficies de Riemann, espacios de dos dimensiones que guardan una estrecha relación con la geometría algebraica y otras ramas de la matemática, como el análisis complejo. «Espero que pronto lleguemos a un punto en que la gente no le dé importancia a que una mujer reciba el premio», señalaba Ingrid Daubechies, investigadora de la Universidad Duke y presidenta de la IMU.

Esta 27.ª edición ha visto también cómo el primer matemático de Latinoamérica (por procedencia, nacionalidad y afiliación) conseguía la medalla de oro. Artur Avila, brasileño-francés que vive a medio camino entre el Instituto de Matemática Pura y Aplicada (IMPA) de Río de Janeiro y el CNRS francés, recibió el galardón por sus investigaciones sobre sistemas dinámicos. Esta área, que también ocupa a Mirzakhani y en la que se entretejen técnicas y conceptos de análisis, topología, ecuaciones diferenciales y geometría, ha sido uno de los temas estrella del congreso.

Otro horizonte prometedor se perfila en teoría de números, un campo que en los últimos años ha vivido avances espectaculares. Entre ellos cabe destacar el firmado en 2013 por Yitang Zhang, de la Universidad de New Hampshire, en relación con la conjetura de los números primos gemelos, o la demostración de la conjetura débil de Goldbach, publicada también el año pasado por el peruano Harald Andrés Helfgott, de la Escuela Normal Superior de París. La conjetura de los primos gemelos afirma que existen infinitos pares de números primos cuya diferencia es 2 (un enunciado chocante, ya que la distancia entre dos números primos consecutivos tiende a aumentar a medida que estos crecen). Zhang no demostró dicho resultado, pero sí uno relacionado: que existen infinitos pares de números primos cuya diferencia está acotada por un número finito (en concreto, por uno menor que 70 millones). La conjetura débil de Goldbach, por su parte, sostiene que todo número impar mayor que 5 puede escribirse como la suma de tres primos. El apelativo «débil» se debe a que sería una consecuencia inmediata de la famosa —y aún por demostrar— conjetura homónima: que todo número par es la suma de dos primos.



JÓVENES TALENTOS: Los medallistas Fields posan con las autoridades durante la ceremonia de inauguración del 27º Congreso Internacional de Matemáticos, celebrado el pasado mes de agosto en Seúl. De izquierda a derecha: Martin Hairer (*cuarto*), Manjul Bhargava (*quinto*), Maryam Mirzakhani (*séptima*) y Artur Avila (*noveno*).

ÁGATA TIMÓN/ICMAT

En teoría de números se engloba también el trabajo de Manjul Bhargava, de la Universidad de Princeton. Junto con el especialista en ecuaciones diferenciales estocásticas Martin Hairer, de la Universidad de Warwick, ambos investigadores completan el cuarteto de los nuevos medallistas Fields.

La unidad de la matemática

Uno de los rasgos comunes a todos los premiados es la interdisciplinaridad de sus investigaciones. La teoría en ecuaciones diferenciales estocásticas desarrollada por Hairer muestra una clara componente algebraica; en el trabajo de Mirzakhani, la geometría es indisoluble del análisis. «Disfruto cruzando las fronteras imaginarias que se levantan entre los diferentes campos», reconocía la matemática iraní.

Las herramientas de un área que se aplican a otra, los teoremas que hacen de puente entre campos aislados y, de un modo más general, las ideas que van más allá de su dominio de concepción han sido protagonistas indiscutibles del programa científico de este ICM. En una reciente visita al Instituto de Ciencias Matemáticas (ICMAT) de Madrid, Carlos Kenig, catedrático de la Universidad de Chicago y director del comité para el programa científico de este ICM, explicaba que su equipo había intentado incluir más charlas transversales que en otros congresos previos: «Queríamos que se viera mucho más la unidad de la matemática».

Esa interdisciplinaridad se ve favorecida por una época en la que el virtuosismo técnico está dejando paso a una nueva forma de pensar, más natural y simple. Tales enfoques, a menudo revolucionarios por inesperados, parten de pregun-

MEDALLISTAS FIELDS 2014

Cada cuatro años, con ocasión del Congreso Internacional de Matemáticos (ICM), la Unión Matemática Internacional hace entrega de las medallas Fields. Descritas a menudo como «los premios Nobel de matemáticas», estas se entregan a dos, tres o cuatro investigadores menores de cuarenta años (en concreto, los premiados no pueden haber cumplido esa edad antes del 1 de enero previo al congreso). Estos fueron los condecorados durante el último ICM, celebrado el pasado mes de agosto en Seúl:

Artur Avila (Brasil, 1979)

Investigador del Instituto de Matemática Pura y Aplicada de Río de Janeiro y el CNRS francés, es experto en sistemas dinámicos. Estudia cualitativamente las soluciones de las ecuaciones diferenciales que los describen; en concreto, el comportamiento a largo plazo de sus trayectorias. Se sabe que estas pueden ser regulares, cuando se tornan estables, o estocásticas, si exhiben un comportamiento caótico.

Junto con sus colaboradores, Avila consiguió entender esta dicotomía a un nivel profundo. El premio le ha sido concedido por varios resultados en esta área. Entre ellos, el «problema de los diez martinis», el cual establece que el espectro de energía de un electrón que se mueve en un campo magnético presenta, para ciertos valores de los parámetros que aparecen en la ecuación de Schrödinger, un comportamiento fractal.

Manjul Bhargava (Canadá, 1974)

Durante su tesis doctoral, y con ayuda de un cubo de Rubik, este catedrático de la Universidad de Princeton y experto en teoría de números encontró una manera de mejorar el trabajo de Gauss sobre las leyes de composición de las formas cuadráticas binarias (polinomios como $Ax^2 + Bxy + Cy^2$) y aplicarlas a formas de grados más altos.

El comité Fields ha premiado también sus trabajos sobre curvas elípticas. Estos objetos permiten pasar de la teoría de números a la geometría, con lo que el problema de encontrar las soluciones racionales de una ecuación se convierte en el de localizar puntos racionales en la curva asociada. Pero, lejos de saber cuantificarlos, en un caso general ni siquiera se sabe si tales puntos existen o no. Para ello, una manera de afrontar el problema consiste en estudiar algunos invariantes de la curva, como el rango. Este número entero vale cero si y solo si la curva tiene un número finito de puntos racionales.

Bhargava y sus colaboradores han demostrado que una proporción de las curvas elípticas (en concreto, el 16, 5 por ciento) tiene rango cero. Ese resultado implica, además, que la conjetura de Birch y Swinnerton-Dyer, uno de los Problemas del Milenio del Instituto Clay, es cierta para, al menos, el 66,48 por ciento de las curvas elípticas. Actualmente Bhargava está trabajando para extender este resultado.

Martin Hairer (Austria, 1975)

Este catedrático de la Universidad de Warwick investiga en ecuaciones estocásticas en derivadas parciales, las cuales describen sistemas que contienen algún grado de aleatoriedad. La cotización de las acciones en Bolsa, por ejemplo, presenta fluctuaciones de este tipo, lo que impide determinar de manera exacta su evolución.

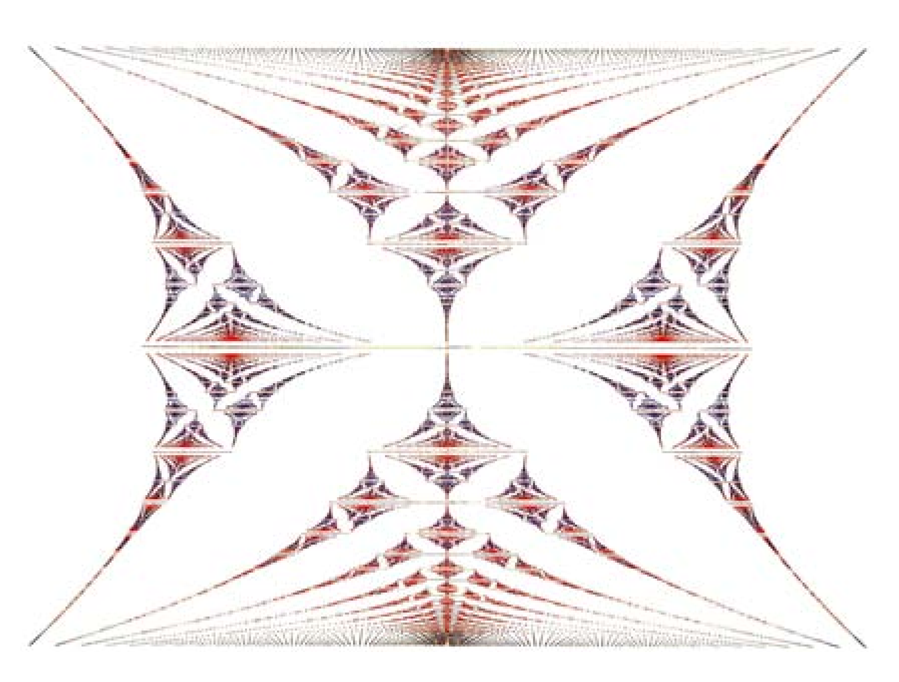
El trabajo de Hairer pretende dar un significado riguroso a muchas de las ecuaciones de este estilo que surgen en la física. Considera que los efectos aleatorios ocurren a una escala pequeña, pero no infinitesimal, lo que implica que pueden resolverse mediante técnicas clásicas. A partir de ahí, regulariza la ecuación en una serie de pasos hasta obtener una ecuación diferencial tratable y con sentido matemático. Sin embargo, para hallar una solución a la ecuación inicial hay que desandar el camino. Hairer ha ideado un método general que hace que las soluciones a la sucesión de modelos intermedios converjan a la solución de la ecuación estocástica original.

Maryam Mirzakhani (Irán, 1977)

La catedrática de Stanford es experta en superficies de Riemann, estructuras geométricas bidimensionales de gran importancia en las matemáticas modernas. La esfera o la superficie que resulta al unir varias rosquillas constituyen algunos ejemplos sencillos de esta clase de espacios.

Mirzakhani ha demostrado que, en este tipo de superficies, el número de geodésicas cerradas que no se cortan a sí mismas (los meridianos, en el caso del globo terrestre) crece de manera polinomial en función del número de agujeros de la superficie. Para ello, relacionó este tipo de curvas con el volumen de espacios de móduli, espacios geométricos que parametrizan clases enteras de objetos de interés (en este caso, superficies de Riemann).

A partir de ese trabajo, Mirzakhani ha abierto una línea de investigación que estudia los billares poligonales (un tipo especial de sistemas dinámicos) por medio de trayectorias en espacios de móduli. Uno de sus resultados más célebres establece que, en estos espacios, las geodésicas complejas tienen un comportamiento mucho más regular de lo que se pensaba, ya que pueden verse en términos de polinomios.



ESPECTRO FRACTAL: Esta imagen, conocida como mariposa de Hofstadter, muestra el espectro de energía de un electrón obligado a moverse en dos dimensiones bajo un campo magnético externo (*en escalas adimensionales, el eje horizontal representa la energía, el vertical, el flujo magnético*). El trabajo de Artur Avila, uno de los medallistas Fields, ha permitido entender las propiedades fractales de esta figura.

tas intuitivas y casi inocentes. El trabajo de Avila, por ejemplo, tiene su origen en una pregunta sencilla: ¿a qué se parece un sistema dinámico típico? También el de Bhargava, que podría motivarse así: ¿qué podemos decir acerca de los puntos racionales de una curva típica? El investigador define su trabajo de manera aún más elemental: «Trato de contar el número de objetos de un tipo dado en ciertas formas del espacio».

Partiendo de tales perspectivas, Bhargava ha conseguido acercarse a la conjetura de Birch y Swinnerton-Dyer, un problema abierto en teoría de números que, debido a su profundidad, fue incluido por el Instituto Clay en su famosa lista de los siete Problemas del Milenio.

Este investigador no es el único que se encuentra próximo al millón de dólares que el instituto ofrece a quien resuelva cada uno de los problemas. El premio Nevalinna, otorgado en cada ICM a investigadores que hayan destacado por sus trabajos en ciencia de la información, recayó este año sobre Subhash Khot, de la Universidad de Nueva York. Como explica Juan Luis Vázquez, catedrático de la Universidad Autónoma de Madrid, su investigación puede ser importante para determinar si P = NP, otro Problema del Milenio. En términos simplificados, este consiste en averiguar si todo problema cuya solución puede verificarse con rapidez admite también un algoritmo que permita hallar rápidamente dicha solución (por ejemplo, resulta sencillo comprobar que 41 × 43 = 1763, pero no se sabe si existe un algoritmo igual de rápido para descomponer 1763 en sus factores primos).

Todas estas preguntas muestran un empeño por trascender lo particular hacia algún tipo de totalidad. Los espacios de móduli, fundamentales en el trabajo de Mirzakhani, permiten considerar al mismo tiempo una gran cantidad de objetos y estudiarlos como un todo.

Esa tendencia a unificar distintas áreas de la matemática tiene su máximo representante en el programa de Langlands. Iniciado en 1967, este engloba una vasta red de conjeturas y resultados que establecen correspondencias entre el análisis armónico, la teoría de números, la geometría algebraica compleja y las representaciones de grupos. Pretende aunar así gran parte de la matemática conocida, como si sus distintos campos fuesen las caras de un mismo dado.

El programa de Langlands estudia las representaciones de ciertos objetos algebraicos y un tipo de funciones asociadas, las funciones *L*, y conjetura que todas las funciones zeta que surgen en teoría de números son casos particulares de estas funciones *L*. Incluso algunos resultados de física teórica han sido reinterpretados en los últimos años en términos de las caras de ese dado. Entre ellos, la dualidad de Montonen-Olive, que generaliza la dualidad electromagnética de las ecuaciones de Maxwell, o la conjetura de la simetría espejo homológica (*homological mirror symmetry*), relacionada con cierta clase de equivalencias entre diferentes teorías de cuerdas [*véase* «El programa de Langlands», por Alberto Ramos Martínez; Investigación y Ciencia, agosto de 2014].

Las herramientas del futuro

Si bien las fronteras entre las disciplinas matemáticas tradicionales comienzan a difuminarse, la distinción —artificial o no— entre matemáticas puras y aplicadas parece menos cuestionada. Si decidimos separar a los ponentes por equipos, en los ICM las puras ganan por goleada.

«Una de las cosas que más se ha criticado del programa de este año, así como de los anteriores, es la falta de una mayor representación de las matemáticas aplicadas», señala Manuel de León, miembro del comité ejecutivo de la IMU y director del ICMAT. «Los matemáticos tenemos que darnos cuenta de que no podemos permanecer en nuestra torre de marfil. Necesitamos hacer llegar nuestra investigación a la gente y, en sentido inverso, ver qué desarrollos matemáticos necesita la sociedad para seguir avanzando.»

Bhargava, por su parte, ve clara la relación entre ambos dominios: «La ciencia básica se guía por la creatividad de los científicos, no por su posible utilidad. Y cuando los investigadores tienen total libertad para pensar, obtienen ideas innovadoras que terminarán aplicándose. Es importante construir un repertorio de buenas ideas, ya que estas serán las herramientas que la sociedad use cuando las necesite».

Conceptos sólidos que, tal y como reza el grabado que en torno a la esfinge de Arquímedes decora las medallas Fields, permitan «trascender el propio espíritu y dominar el mundo».

—Ágata Timón García-Longoria
—David Fernández
Instituto de Ciencias Matemáticas
Madrid

PARA SABER MÁS

Lectures on the Langlands program and conformal field theory. Edward Frenkel en *Frontiers in number theory, physics, and geometry*, vol. II, págs. 387–533. Springer, Berlín, 2007.

IMU Prizes 2014. Unión Matemática Internacional. **www.mathunion.org/general/prizes/2014**

GENÉTICA

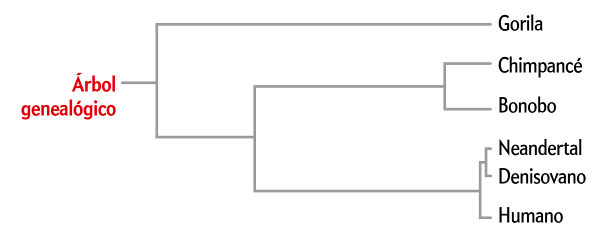
Una diferencia mínima, pero notable

Las comparaciones del genoma revelan el ADN que distingue a *Homo sapiens* de sus parientes cercanos

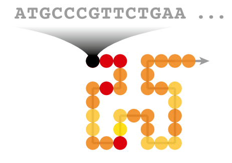
KATE WONG

En 1871, Charles Darwin dedujo que la especie humana estaba emparentada más estrechamente con los grandes simios africanos que con cualquier otra especie viviente. La reciente secuenciación de los genomas del gorila, el chimpancé y el bonobo confirma su deducción y ofrece una visión más clara de nuestros lazos comunes: el chimpancé y el bonobo ocupan un lugar preeminente como parientes vivos más cercanos, pues comparten con nosotros el 99 por ciento del ADN, seguidos por los gorilas con el 98 por ciento.

Pero esa diminuta fracción de ADN que nos separa constituye todo un mundo: nos confiere tanto el bipedismo como la capacidad para organizar misiones a Marte, entre otras facultades. Ignoramos todavía cómo ese ADN exclusivo afecta a la función de los genes, pero los análisis del genoma completo arrojan resultados fascinantes. Así, si comparamos el 33 por ciento del genoma humano que codifica proteínas con el de nuestros parientes, descubrimos que, pese a la reducida suma total de las diferencias genéticas, las individuales pululan por doquier a lo largo del genoma e influyen en los cromosomas de muy distintos modos.



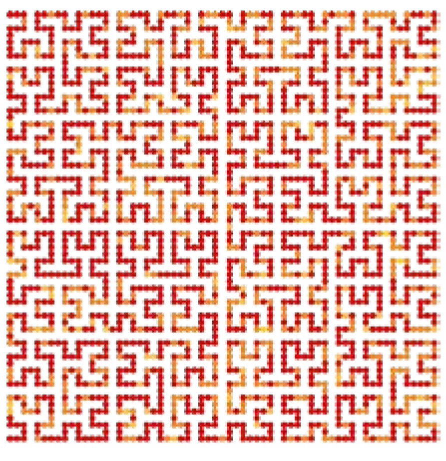
Cada punto representa una secuencia de unos 500.000 pares de bases químicas (las letras A, T, C y G del código genético) en la parte del genoma humano que codifica proteínas, en el orden en que aparecen en nuestros cromosomas.



El color del punto indica el grado de concordancia entre la secuencia humana y la de la especie confrontada; el rojo señala la diferencia más acusada.

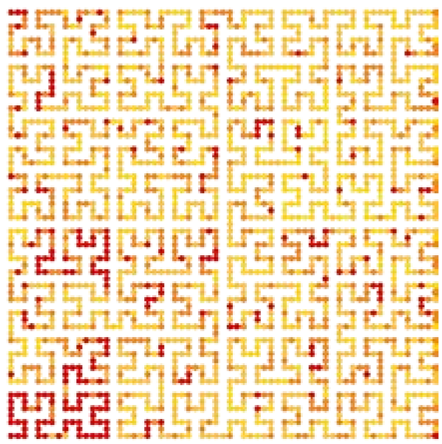
Proporción de bases diferentes o desalineadas (%)

0,2 0,5 1,5 3,0 6,0



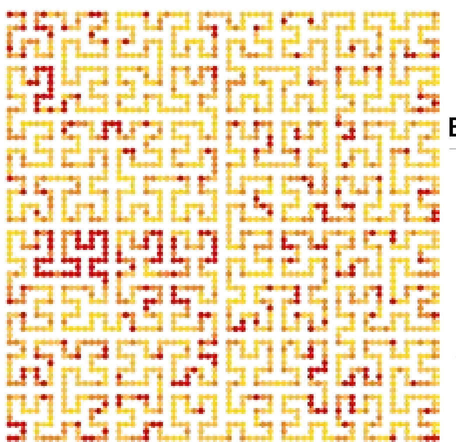
Gorila

El genoma humano y del gorila difieren más entre sí que el humano y el del chimpancé o el bonobo, un reflejo de que hemos evolucionado por sendas distintas desde hace más tiempo. Aun así, cerca del 15 por ciento del genoma humano guarda mayor semejanza con el genoma del gorila que con el del chimpancé y el bonobo.



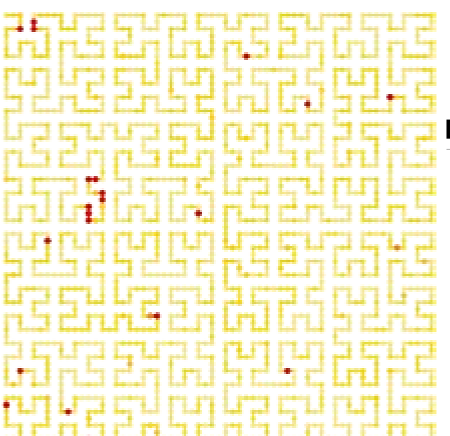
Chimpancé

Tradicionalmente se ha considerado que el chimpancé, que vive en sociedades patriarcales, es nuestro pariente vivo más cercano, por lo que constituiría el mejor modelo para reconstruir la vida de nuestros ancestros. Sin embargo, los recientes estudios de secuenciación genómica ponen en tela de juicio esta idea.



Bonobo

El genoma del bonobo, que presenta una estructura social matriarcal, es tan similar al nuestro como el del chimpancé, aunque diferimos de ambos en modos distintos. Estos resultados podrían obligar a replantear el modo de vida de nuestros antecesores remotos.



Denisovano

Los denisovanos, un grupo de humanos primitivos estrechamente emparentados con los neandertales, se diferencian en las secuencias mucho menos de nosotros que cualquiera de los simios antropomorfos africanos; ello se debe a que compartimos con él un ancestro común en un pasado mucho más reciente, hace unos 400.000 años.

FUENTES: UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA, SANTA CRUZ, GENOME BROWSER (*datos de chimpancé, gorila y bonobo*); SOCIEDAD MAX PLANCK (*datos de denisovano*); «INITIAL SEQUENCE OF THE CHIMPANZEE GENOME AND COMPARISON WITH THE HUMAN GENOME», POR EL CHIMPANZEE SEQUENCING AND ANALYSIS CONSORTIUM EN *NATURE*, VOL. 437, SEPTIEMBRE DE 2005; «INSIGHTS INTO HOMINID EVOLUTION FROM THE GORILLA GENOME SEQUENCE», POR AYLWYN SCALLY ET AL. EN *NATURE*, VOL. 483, MARZO DE 2012; «THE BONOBO GENOME COMPARED WITH THE CHIMPANZEE AND HUMAN GENOMES», POR KAY PRÜFER ET AL. EN *NATURE*, VOL. 486, JUNIO DE 2012; «A HIGH-COVERAGE GENOME SEQUENCE FROM AN ARCHAIC DENISOVAN INDIVIDUAL», POR MATTHIAS MEYER ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 338, OCTUBRE DE 2012.; GRÁFICA DE MARTIN KRZYWINSKI, ILUSTRACIONES DE PORTIA SLOAN ROLLINGS

LA SAGA





HUMANA

REESCRIBIR LA EVOLUCIÓN

Una avalancha de hallazgos recientes ha obligado a los expertos a revisar casi todos los capítulos de nuestra historia evolutiva

Kate Wong



Tras dejar atrás el Buzón, trepar por la Espalda del Dragón y bajar por la Rampa, se llega a la Caja del Rompecabezas. El pasado otoño, el mundo entero pudo seguir a través de tuits, blogs y vídeos a los científicos que sorteaban esos obstáculos de nombre tan imaginativo en Rising Star, una galería de cuevas situada en las afueras de Johannesburgo. Los pasos estrechos y los grandes desniveles hacían el trabajo difícil y peligroso. Los investigadores, sin embargo, solo tenían los ojos puestos en el premio: los restos fósiles de un extinto miembro de la familia humana. Aunque las excavaciones paleoantropológicas suelen realizarse en secreto, en esta ocasión los expertos publicaron un apasionante material multimedia para que todo aquel que lo desease siguiera sus hazañas.

Los fósiles habían sido descubiertos el mes de septiembre anterior, cuando un grupo de espeleólogos exploraba este sistema de cuevas poco conocido del área sudafricana apodada la Cuna de la Humanidad. Aun sin saber su antigüedad ni a qué especie pertenecían, los investigadores estaban seguros de que se trataría de un descubrimiento de primer orden. La mayor parte del registro fósil humano consta, o bien de fragmentos de cráneo, o bien de huesos del cuello para abajo. Aquel hallazgo incluía ambos. Por sí solo, eso ya merecería un lugar destacado en los manuales de paleoantropología. Pero, al extraer los fósiles, los expertos se percataron de que habían dado con algo mucho mayor. En la cueva no solo yacían los restos de un individuo, como habían creído al principio, sino los de una población entera.

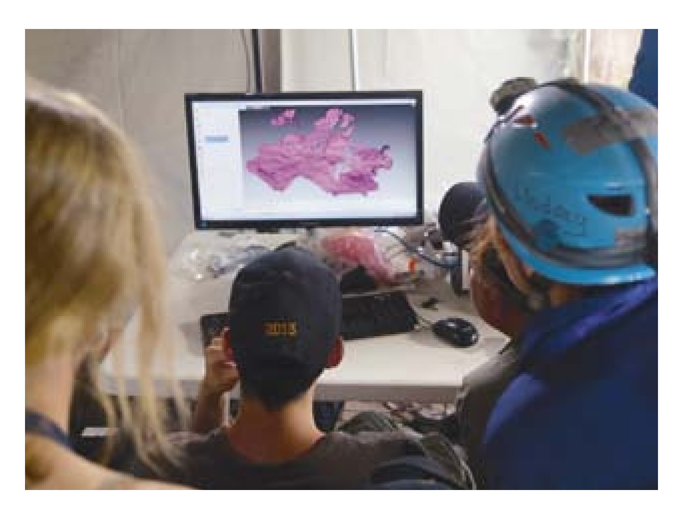
En dos expediciones cortas que duraron cuatro semanas en total, un equipo dirigido por el paleoantropólogo Lee Berger, de la Universidad del Witwatersrand, en Johannesburgo, extrajo más de 1500 fragmentos óseos. De la cavidad donde se conservaban, a 30 metros de la superficie, los llevaron al exterior de la cueva. Allí, otros investigadores los clasificaban y llenaban con ellos más y más cajas. Con todo, solo estaban arañando la superficie. En estos momentos aún quedan por desenterrar miles de fósiles. Si sigue a este ritmo, Rising Star bien podría convertirse en el mayor yacimiento de fósiles humanos del mundo.

KATY WIEDEMANN





ESPELEOLOGÍA CIENTÍFICA: **K. Lindsay Eaves (*arriba a la izquierda*) es una de las expertas que ha participado en la recuperación de más de 1500 fósiles de nuestros antepasados (*arriba a la derecha*) en Rising Star, un sistema de cuevas próximo a Johanesburgo. Las reconstrucciones tridimensionales de la gruta (*abajo*) permiten a los investigadores inventariar sus hallazgos a medida que excavan.**



La importancia exacta del descubrimiento aún se ignora. Los investigadores han hecho públicos los trabajos de excavación, pero los detalles científicos se mantienen velados. Quizá los fósiles procedan de una especie desconocida y, al igual que los que Berger y sus colaboradores encontraron en el cercano yacimiento de Malapa hace pocos años, ayuden a esclarecer el misterioso origen del género *Homo*. El gran número de individuos hallados tal vez posibilite conocer la estructura social del grupo al que pertenecían. Y puede que la comparación de los restos humanos con los de otros animales encontrados en el mismo yacimiento permita descifrar por qué acabaron en aquel lugar. Las respuestas quizá aparezcan en breve, pues el equipo de expertos ya ha comenzado a preparar la descripción y el análisis formal de los restos para su publicación.

Quienes somos ajenos al descubrimiento no podemos aventurar en qué medida reescribirá este nuestros orígenes, pero la historia nos ha enseñado que seguramente lo hará. El de Rising Star es el último de una serie de hallazgos que, en lo que va de milenio, han sacudido los cimientos sobre los que se asentaba nuestra visión de la evolución humana. Nuevos fósiles han añadido ramas al árbol genealógico de nuestra especie; los datos climáticos han revelado en qué condiciones ambientales evolucionaron nuestros ancestros y cuáles marcaron la aparición de los rasgos distintivos de *Homo sapiens*; los estudios primatológicos nos muestran qué nos distingue, desde un punto de vista cognitivo, de nuestros parientes simios, y los análisis de ADN nos han ayudado a averiguar cómo se relacionaban entre sí estas especies pasadas y cómo la nuestra continúa cambiando.

Desbordados por todos esos nuevos datos, los expertos se han visto obligados a revisar casi todos los capítulos de nuestra historia evolutiva, desde el remoto origen de la humanidad hasta el triunfo de *Homo sapiens* sobre neandertales y otras especies arcaicas. Nunca los estudios sobre evolución humana habían vivido una actividad tan frenética. Nunca antes nos habíamos sentido tan atraídos por nuestro pasado.

Para apreciar hasta qué punto ha avanzado la paleoantropología en los últimos años, podemos remontarnos a finales de los noventa, una época en que los expertos creían conocer bien la evolución de nuestra especie. El registro fósil humano era relativamente abundante —sobre todo en comparación con el de los grandes simios, nuestros parientes vivos más próximos— y los datos genéticos parecían encajar con la historia narrada por dichos restos. Según esta, los primeros homininos (el grupo que incluye a *Homo sapiens* y sus parientes extintos) surgieron en África hace unos 4,4 millones de años. *Homo*, nuestro género, apareció hace algo más de 2 millones de años. Un millón de años después, los homininos abandonaron África y comenzaron a poblar el Viejo Mundo. A medida que los homininos se establecían emergieron nuevas especies de *Homo*, como los neandertales en Eurasia. Estas medraron durante miles de años hasta que, un buen día, una nueva especie africana inició su dispersión por



el globo. Mucho más inteligente y provisto de lenguaje y una tecnología sin igual, *Homo sapiens* conquistó el mundo con rapidez. A su paso, provocó la extinción de neandertales y del resto de las especies arcaicas. No hubo mezcla ni hibridación alguna que transmitiese los genes neandertales a las siguientes generaciones: solo un reemplazo de la vieja guardia por *Homo sapiens*. En el mejor de los casos, a través de la competencia; en el peor, por medios violentos. Hace 30.000 años, la nuestra era la única especie de homininos que quedaba sobre la Tierra. Así al menos rezaba la historia hasta hace bien poco.

Sin embargo, el registro fósil y los datos genéticos obtenidos durante los últimos años han puesto en tela de juicio cada uno de los capítulos de dicha narración e incluso han invalidado por completo algunos de ellos. Los fósiles de siete millones de años de antigüedad hallados en el desierto de Djurab, al norte del Chad, han obligado a situar nuestro origen unos dos millones de años antes de lo que se pensaba y, al mismo tiempo, plantean la posibilidad de que los homininos no surgiesen en África oriental, sino en la occidental. Por otro lado, los fósiles de casi dos millones de años de antigüedad hallados en Malapa, en Sudáfrica, apuntan a que tal vez el género *Homo* haya dado sus primeros pasos en esta parte del continente, y no en África oriental.

Los fósiles humanos de 1,78 millones de años de antigüedad encontrados en Dmanisi, en la República de Georgia, demuestran que los homininos salieron de África cientos de miles de años antes de lo que creíamos; en particular, mucho antes de que *Homo* desarrollase los rasgos a los que se atribuía su expansión: largas piernas, un cerebro voluminoso y una tecnología avanzada. El sorprendente hallazgo de una especie hominina diminuta que habitó hace apenas 17.000 años en la isla de Flores, en Indonesia, sugiere que tal vez nuestros antepasados abandonasen África incluso antes de lo que indican los fósiles de Dmanisi. *Homo floresiensis*, como ha dado en llamarse a la especie de la isla de Flores, tenía un cuerpo y un cerebro excepcionalmente pequeños, lo que hace pensar en un ancestro australopitecino que habría abandonado África hace más de dos millones de años.

Pero tal vez el capítulo de la odisea humana que más modificaciones ha sufrido sea el del propio *Homo sapiens*. Lejos de representar un salto evolutivo destinado a dominar el mundo desde su aparición, el registro fósil nos muestra a una especie que casi sucumbió nada más surgir como consecuencia de un cambio climático. Las diferencias cognitivas entre *Homo sapiens* y otras especies arcaicas no eran tan marcadas. El descubrimiento de útiles complejos, como los huesos para tratar pieles que hoy sabemos que usaban los neandertales, indican que estos últimos eran mucho más avanzados de lo que se pensaba. Y las pruebas de que se acicalaban con pinturas, abalorios y plumas revelan que gozaban de un pensamiento simbólico que, hasta hace poco, se creía exclusivo de *Homo sapiens*. La imagen del neandertal como un rudo hombre de las cavernas se ha demostrado falsa.

En consonancia con esa imagen de un neandertal no tan distinto del humano anatómicamente moderno, los estudios genéticos han demostrado que ambos grupos se cruzaron. Y que lo hicieron con tal frecuencia que, en la actualidad, los humanos no africanos conservamos hasta un 3 por ciento de material neandertal en nuestro genoma. Dado que esos fragmentos difieren de un individuo a otro, algunos cálculos recientes indican que, tomados en conjunto, el acervo genético neandertal existente hoy en nuestra especie llegaría, al menos, al 20 por ciento.

Los neandertales no fueron el único grupo de humanos arcaicos con el que se hibridó *Homo sapiens*. Los denisovianos, identificados hace muy poco gracias a las muestras de ADN extraídas de una falange de 40.000 años de antigüedad hallada en una cueva siberiana, también se cruzaron con nuestros antepasados. De hecho, el intercambio sexual con otros homininos parece habernos beneficiado. Algunos genes de origen neandertal, por ejemplo, habrían mejorado nuestro sistema inmunitario. Y una variante de los genes denisovanos ayuda a los tibetanos a vivir en altitudes extremas.

Pero, a pesar de todos los lazos que nos unen a nuestros parientes evolutivos, algunos rasgos nos siguen diferenciando de ellos. En este monográfico exploraremos la manera en que han evolucionado las características que nos hacen humanos, desde la capacidad para caminar erguidos hasta nuestra incomparable capacidad de cooperación. La historia que presentamos a continuación se divide en tres capítulos. El primero examina nuestro intrincado árbol genealógico y los factores que favorecieron la supervivencia de *Homo sapiens* frente a otras especies. El segundo examina los rasgos que nos distinguen de otros primates y evalúa cuáles de ellos nos han ayudado a prosperar. Por último, el tercero reflexiona sobre el futuro evolutivo de una especie que vive en un mundo rebosante de soluciones tecnológicas a casi cualquier problema, desde la soledad hasta las enfermedades.

Esperamos que el lector disfrute de esta historia, la cual comenzó a escribirse hace siete millones de años. Por supuesto, el relato que ofrecemos aquí no aporta la última palabra. Al igual que la evolución humana parece estar acelerándose, también los hallazgos paleoantropológicos se suceden cada vez más rápido. Como no podía ser de otra manera.



PARTE 1
DE DÓNDE VENIMOS

Nuestro intrincado árbol genealógico
PÁGINA 22

Cambios climáticos y evolución humana
PÁGINA 28

A golpe de suerte
PÁGINA 34

PARTE 2
QUÉ NOS HACE ESPECIALES

Ventajas evolutivas de la monogamia
PÁGINA 48

Raíces del espíritu cooperativo
PÁGINA 54

La pequeña gran diferencia
PÁGINA 58

La receta humana de la crianza
PÁGINA 66

PARTE 3
ADÓNDE NOS DIRIGIMOS

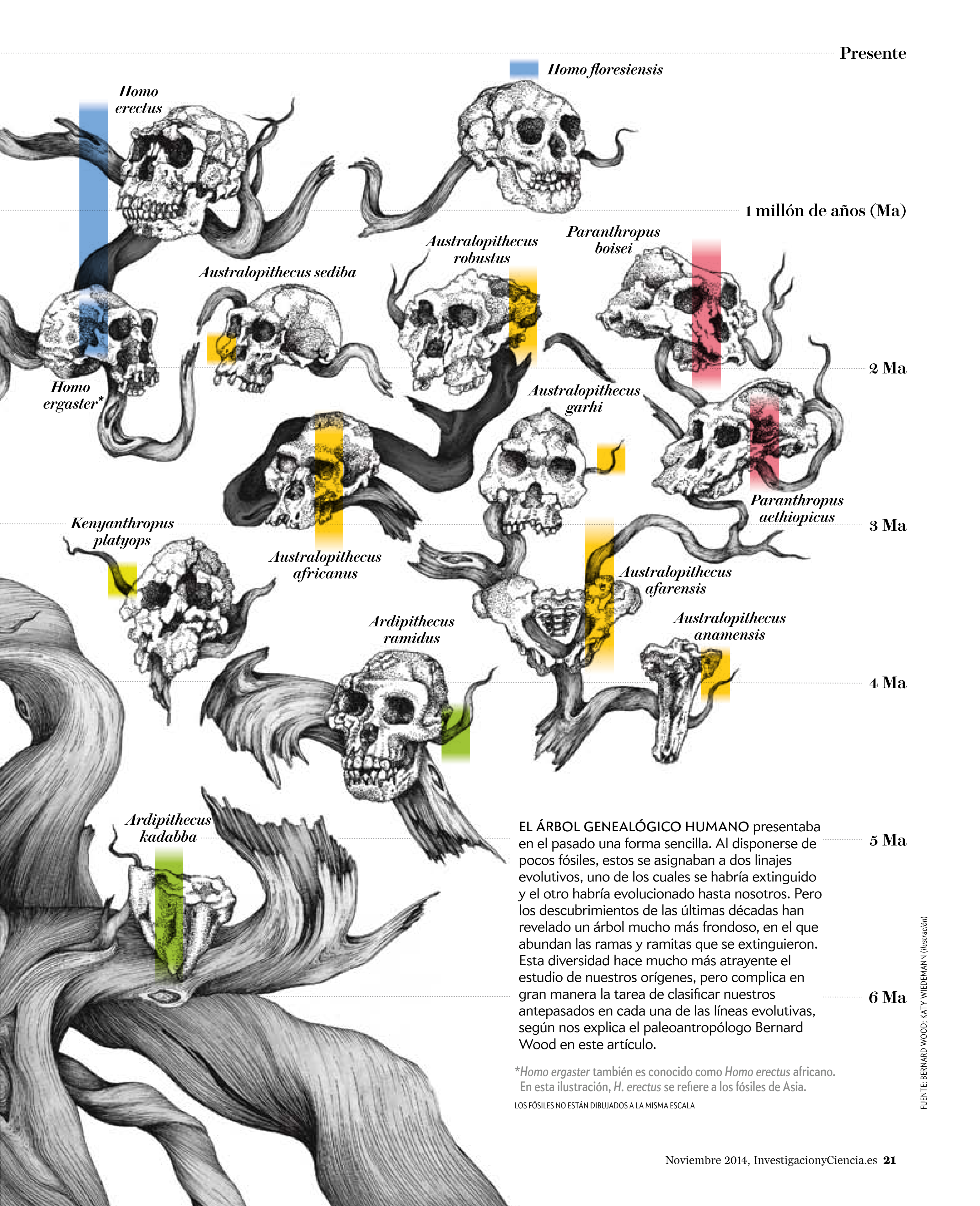
El primate interconectado
PÁGINA 76

El futuro de la evolución humana
PÁGINA 80



1

DE DÓNDE VENIMOS



EL ÁRBOL GENEALÓGICO HUMANO presentaba en el pasado una forma sencilla. Al disponerse de pocos fósiles, estos se asignaban a dos linajes evolutivos, uno de los cuales se habría extinguido y el otro habría evolucionado hasta nosotros. Pero los descubrimientos de las últimas décadas han revelado un árbol mucho más frondoso, en el que abundan las ramas y ramitas que se extinguieron. Esta diversidad hace mucho más atrayente el estudio de nuestros orígenes, pero complica en gran manera la tarea de clasificar nuestros antepasados en cada una de las líneas evolutivas, según nos explica el paleoantropólogo Bernard Wood en este artículo.

**Homo ergaster* también es conocido como *Homo erectus* africano. En esta ilustración, *H. erectus* se refiere a los fósiles de Asia.

LOS FÓSILES NO ESTÁN DIBUJADOS A LA MISMA ESCALA

FUENTE: BERNARD WOOD; KATY WIEDEMANN (*ilustración*)



NUESTRO INTRINCADO ÁRBOL GENEALÓGICO

Los últimos análisis genéticos y los hallazgos recientes de fósiles señalan que la historia de la evolución humana es mucho más enrevesada e intrigante de lo que nadie había imaginado

Bernard Wood

CHRISTIAN NORTHEAST

EN SÍNTESIS

Hace algún tiempo, la historia evolutiva de *Homo sapiens* se nos antojaba bastante sencilla: *Australopithecus* habría sido el antepasado de *Homo erectus*, este habría dado lugar a los neandertales y estos, a su vez, a nuestra especie.

Pero los descubrimientos de fósiles realizados en África durante los últimos cuarenta años, entre otros motivos, han hecho añicos esta hipótesis.

Los últimos estudios demuestran que en el planeta coexistieron varias especies de homininos en diferentes momentos. Durante las próximas décadas, los paleoantropólogos intentarán descifrar qué relación guardaban entre sí y cuáles de ellas corresponden a nuestros antepasados directos.

Bernard Wood, paleoantropólogo con formación en medicina, trabaja en la Universidad George Washington. Su interés por la evolución humana nació en 1968, cuando, como estudiante de medicina, participó en las expediciones de Richard Leakey en el norte de Kenia.





RAS RETIRAR LAS TAPAS DE dos grandes cajas de madera, Lee Berger me preguntó: ¿Qué te parece? En cada una de ellas reposaban sendos esqueletos fósiles de tipo humano descubiertos en Malapa, en Sudáfrica. Los ejemplares, correspondientes a individuos fallecidos hace dos millones de años, habían creado un gran revuelo. La mayoría de los fósiles humanos constituyen hallazgos aislados. Se descubre una mandíbula en un lugar y aparece un hueso del pie en otro. Los científicos deben averiguar si las piezas pertenecieron a la misma persona. Imaginemos que mientras caminamos por una carretera encontramos piezas de coches: un guardabarros roto aquí, parte de una transmisión más allá... ¿Pertenecen al mismo modelo? O, en vez de un coche, ¿no podrían proceder de una camioneta?



Los esqueletos de Malapa, en cambio, aunque no están completos, conservan los suficientes elementos como para reducir la posibilidad de que se hubiesen juntado por azar. Al igual que el esqueleto de Lucy, descubierto en Etiopía en 1974, y el del «chico del Turkana», hallado en Kenia en 1984, ofrecen mucha más información que los fósiles aislados. Pero la causa de que hayan recibido tanta atención no solo se debe a su integridad y buen estado de conservación. El paleoantropólogo Lee Berger, de la Universidad de Witwatersrand, en Johannesburgo, opina que los individuos formaban parte de una población que era antepasada directa de nuestro propio género, *Homo*.

Todos poseemos antepasados. Mi anciano padre vive todavía, tuve la suerte de haber conocido a mis cuatro abuelos y puedo incluso recordar vagamente a tres de mis bisabuelos. Pero también cuento con familiares cercanos que no son mis antepasados. No son muchos, ya que mi padre y yo hemos sido hijos únicos, pero tengo dos parejas de tíos y tías. Aunque constituyen una parte esencial del árbol genealógico de sus descendientes, para mi propia familia solo son el equivalente a los «componentes adicionales» de un automóvil. Por esta razón, Berger quería que dejase de observar los detalles anatómicos de los dientes y las mandíbulas y le dijera si pensaba que los esqueletos de Malapa eran el equivalente evolutivo de mis padres y abuelos, o bien de mis tíos y tías. En otras palabras, ¿pertenecieron a una población antepasada directa de los humanos modernos o representaban tan solo familiares cercanos?

Hace casi cincuenta años, cuando empecé a estudiar los fósiles humanos en África oriental, imperaba la idea de que casi todos nuestros parientes extintos eran antepasados directos. Y, a medida que retrocedíamos en el pasado, iban adquiriendo una apariencia menos humana y más simiesca. Gracias a los estudios genéticos y al registro fósil, hoy sabemos que, durante los últimos cien mil años, nuestros ancestros directos coincidieron en el planeta con varios de nuestros parientes cercanos, como los neandertales y los denominados «hobbits», u *Homo floresiensis*, hallados en la isla de Flores, en Indonesia. Además, otros fósiles demuestran que mucho antes, hace entre uno y cuatro millones de años, hubo largos períodos en los que nuestros antepasados



TESORO OCULTO: Científicos de Sudáfrica excavan en el yacimiento de Malapa (*arriba*). Allí se han descubierto dos esqueletos muy completos de homininos de hace dos millones de años (*izquierda*).

BRENT STIRTON, REPORTAJE DE *GETTY* (*esqueletos y yacimiento*)

y otros parientes próximos habitaron la Tierra al mismo tiempo. La presencia de múltiples ramas evolutivas en un mismo momento hace mucho más difícil identificar los antepasados directos de los humanos actuales, algo que los paleontólogos de hace veinte años no se imaginaban. Este reto también significa que la historia de la evolución humana es mucho más compleja y fascinante de lo que la mayoría de nosotros pensábamos.

¿UNA O VARIAS RAMAS?

En 1968, cuando me adentré en esta disciplina, la teoría de Charles Darwin sobre la forma del árbol de la vida estaba muy arraigada. Según esta, todos los seres vivos se unen de la misma manera en que se conectan las ramas de un árbol. En él, las especies actuales se sitúan en la superficie de la copa, mientras que las extintas se localizan hacia el tronco. Del mismo modo que una persona tiene por fuerza antepasados, también los han debido tener todas las especies del presente. Así, las únicas ramas o linajes que deberían formar parte del árbol de la vida son aquellas que conectan las especies actuales con las profundidades del árbol, y las únicas especies extintas que pueden incluirse en él deben situarse en esas ramas de conexión. Cualquier otra especie representa un callejón evolutivo sin salida.

En el caso de los humanos y los simios actuales, esta regla significa que las únicas ramas y especies que deberían aparecer en nuestra parte del árbol son las que nos unen al antepasado común que compartimos con los chimpancés y los bonobos. Según las pruebas moleculares, este ancestro pudo haber vivido hace entre unos cinco y ocho millones de años.

En los años sesenta del siglo XX, la rama del árbol de la vida que terminaba en los humanos modernos parecía bastante sencilla. En su base se hallaba *Australopithecus*, el hombre-mono que los paleoantropólogos habían descubierto en el sur de África a mediados de los años veinte. Se propuso que *Australopithecus* había sido sustituido por el *Homo erectus* de Asia, más alto y de mayor tamaño cerebral; esta especie se habría extendido por Europa y habría dado lugar a los neandertales, que a su vez evolucionaron hasta convertirse en *Homo sapiens*. Se interpretaba que todas estas especies eran antepasadas directas de los humanos actuales, el equivalente de mis padres, abuelos y bisabuelos. Solo un grupo de homininos (familia integrada por los humanos actuales y las especies extintas que están más estrechamente emparentadas con los humanos que con los chimpancés o los bonobos), los denominados australopitecinos robustos, dotados de grandes mandíbulas y enormes dientes, ocupaban una rama lateral sin descendencia. Eran el equivalente de mi tío y mi tía.

Esa forma de pensar cambió cuando Louis y Mary Leakey empezaron a descubrir fósiles de homininos en la Garganta de Olduvai, en Tanzania, un hecho que hizo trasladar el foco de las investigaciones sobre los primeros homininos desde el sur hacia el este de África. La atención no solo cambió porque en la década de los sesenta el goteo de hallazgos fósiles en la región oriental se convirtió en un auténtico torrente, sino también porque el contexto de los fósiles en esa parte del continente era muy diferente al del sur, en especial en lo que concernía a las dataciones.

En África austral, la mayoría de los fósiles de homininos se encontraron, y siguen encontrándose, en cuevas formadas en dolomías (una roca de carbonato cálcico rica en magnesio). Aunque en algunas ocasiones se ha descubierto el esqueleto bien preservado de algún individuo (como los de Malapa), la mayor parte de los fósiles de homininos primitivos hallados en estas cuevas correspondían a las sobras de la comida de leopardos y

otros depredadores. Los huesos y los dientes que no consumían eran transportados por el agua al interior de la cueva junto con partículas del suelo superficial. Una vez dentro, el sedimento y los huesos se depositaban y originaban conos o taludes, de modo semejante al montículo que se forma en la parte inferior de un antiguo reloj de arena. Pero en las cuevas, las capas o estratos no se hallan tan ordenadas; las más antiguas no siempre siguen la norma de situarse en la parte inferior, ni las más recientes en la superior. Por otro lado, los investigadores hasta hace poco no han dispuesto de un método de datación fiable con el que conocer la antigüedad de los sedimentos. En los años sesenta, todo lo que podían hacer era situar el hominino en una secuencia temporal bastante tosca construida a partir de los fósiles de otros animales hallados en las mismas cuevas.

En cambio, los fósiles de homininos del este de África se hallaron en yacimientos cercanos al valle del Rift oriental, que atraviesa esta parte del continente desde el mar Rojo, en el norte, hasta las costas del lago Malawi y más allá, hacia el sur. Los restos no aparecen en el interior de cuevas, sino en los sedimentos que se depositaron en las orillas de los lagos y las riberas de los ríos. Muchas de estas capas conservan la dirección del campo magnético terrestre en el momento en que se posaron. Por tratarse de yacimientos al aire libre, los estratos incorporaron la ceniza expulsada por los numerosos volcanes situados cerca del valle del Rift oriental, una zona con abundantes movimientos de las placas tectónicas. Gracias a estas circunstancias, los investigadores disponen de otra forma de establecer la edad de los estratos de un yacimiento que es independiente de los fósiles que contienen. Además, como las capas de ceniza volcánica se depositaron en una fecha concreta y se esparcieron como una manta en una región muy amplia, se pueden correlacionar fósiles de lugares separados miles de kilómetros unos de otros.

Muchos de los yacimiento más ricos en fósiles de homininos de África oriental, como los de la cuenca del Omo-Turkana y más al norte a lo largo del río Awash, presentan estratos que abarcan períodos de varios millones de años. Por consiguiente, es posible atribuir una edad máxima y mínima a cada grupo de fósiles. Este método ha permitido demostrar que, durante la mayor parte del tiempo hace entre uno y cuatro millones de años, habitaba más de una especie de hominino en el este del continente —y ya no digamos entre el este y el sur—, y en algunos períodos coexistían varias de ellas. De este modo, a lo largo de casi un millón de años (hace entre 1.400.000 y 2.300.000 años), convivieron en África oriental dos especies de homininos, *Paranthropus boisei* y *Homo habilis*. Eran tan distintos que un guía de safaris prehistóricos señalaría que sus cráneos y dientes resultan casi imposibles de confundir, sin importar cuán fragmentarios sean los fósiles. También está claro que los homininos del este son diferentes de los del sur, pero ya trataremos esta cuestión más adelante.

Hallar restos de *P. boisei* y *H. habilis* en los mismos estratos no significa necesariamente que los dos homininos utilizaran a la vez el mismo pozo de agua, ya que los sedimentos abarcan miles de años. Pero sí permite deducir que al menos uno de estos homininos no fue antepasado directo de los humanos modernos, o quizá ninguno de los dos. Aunque las investigaciones sobre la evolución humana tardía indican que hubo cierta hibridación entre los neandertales y los humanos modernos, en mi opinión esta resultó improbable entre *P. boisei* y *H. habilis* debido a las grandes diferencias en sus rasgos físicos. Y si se produjo, fue tan infrecuente que no logró borrar las desigualdades notables entre ambas especies. En otras palabras, la idea de una única rama no parece apropiada para representar los homininos de hace dos millones de años. El árbol de nuestros primeros ancestros se parece más a un manojo de ramas, o incluso a un arbusto enmarañado.

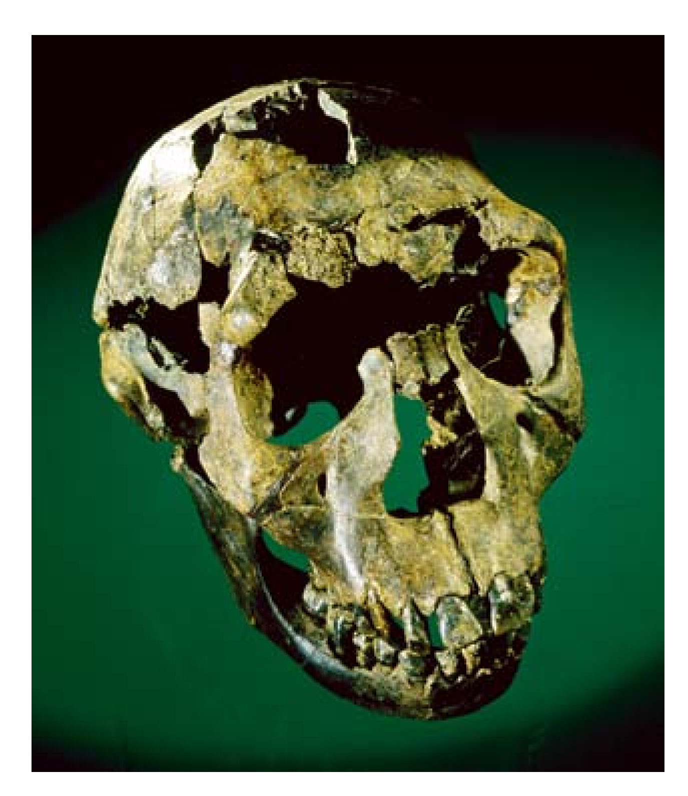
También hay pruebas de que existieron múltiples linajes en nuestro pasado más reciente. Los neandertales han sido reconocidos como una especie distinta durante más de 150 años, y a lo largo de este tiempo se han descubierto cada vez más rasgos que los distinguen de los humanos actuales. Sabemos que un tercer hominino, *H. erectus*, probablemente sobrevivió más tiempo de lo que se pensaba. Hubo una cuarta especie, *H. floresiensis*, que aunque pudo estar confinada en la isla de Flores vivió en los últimos 100.000 años. También, a partir del ADN fósil extraído en un hueso de dedo de hace 40.000 años, se han hallado indicios de un quinto grupo de homininos, los denisovanos. Y en el ADN de los humanos modernos han aparecido pruebas de al menos un linaje «fantasma» que vivió hace unos 100.000 años. Por lo tanto, nuestra historia evolutiva reciente también es mucho más tupida de lo que se pensaba hace solo diez años.

Quizá no debería de habernos sorprendido el descubrimiento de tanta diversidad en nuestra evolución. En numerosos grupos de mamíferos, la existencia coetánea de especies afines parece haber sido la regla en el pasado. ¿Por qué deberían ser diferentes los homininos? Aun así, algunos científicos critican este esquema tan ramificado y piensan que los paleoantropólogos han mostrado demasiado entusiasmo a la hora de identificar nuevas especies, tal vez con el deseo de adquirir fama o más fondos para la investigación.

Diversas pruebas genéticas y restos fósiles indican que diferentes especies de homininos coexistieron en el planeta varias veces durante los últimos millones de años; ello hace muy difícil identificar a los antepasados directos de los humanos, algo que no imaginaban los científicos de hace veinte años

No obstante, opino que nos encontramos ante un hecho real. En primer lugar, hay razones contundentes y lógicas para sospechar que el registro fósil siempre subestima el número de especies. En segundo lugar, el estudio de animales actuales nos enseña que numerosas especies claramente distintas son difíciles de diferenciar si solo nos fijamos en los huesos y los dientes, el único tipo de material que sobrevive en el registro fósil. Además, la mayoría de las especies de mamíferos que vivieron hace entre uno y tres millones de años carecen de descendientes vivos directos. Por consiguiente, la coexistencia de varios homininos que no poseyeran descendientes directos no resultaría tan extraña después de todo.

Si la diversidad de los homininos en el pasado fue elevada, corresponde a los biólogos descubrir qué tipo de presiones evolutivas la propiciaron. El clima representa una de las posibles causas más claras. Este varía a lo largo del tiempo y, como consecuencia, también los hábitats. Se producen tendencias y también oscilaciones dentro de esas tendencias. Durante el período



HALLAZGO EN TURKANA: El cráneo fósil de un individuo joven de *Homo ergaster* que vivió y murió en Kenia hace 1,6 millones de años.

KEN GARRETT, *NATIONAL GEOGRAPHIC*

que estamos considerando hubo una tendencia hacia un clima más frío y seco, pero dentro de ella se produjeron oscilaciones a intervalos predecibles. Se alternaron tiempos más cálidos y húmedos con otros más fríos y secos. Un comportamiento, dieta o locomoción que habían resultado ventajosos en un período pudieron no serlo tanto en otro. Otra presión que hizo aumentar la diversidad de los homininos quizá fuera la competencia entre ellos. Si dos especies similares compartían un hábitat, podrían haberse forzado mutuamente a adoptar distintas estrategias de supervivencia. Este fenómeno se denomina desplazamiento de caracteres y puede explicar las diferencias en los dientes y en las mandíbulas entre *P. boisei* y *H. habilis*. Mientras que el primer grupo se nutría de alimentos duros y fibrosos, el segundo prefería los más blandos pero más difíciles de encontrar, como las frutas, y en ocasiones también comía carne o médula ósea. Por otra parte, cuando los homininos fueron desarrollando diversos comportamientos y culturas, su distinta visión del mundo podría haber impedido que las especies se fusionasen a través del mestizaje.

Además de estudiar las diferencias anatómicas, hoy es posible examinar los fósiles mediante el análisis molecular. Sin embargo, todavía no disponemos de información genética sobre los primeros homininos. Por lo tanto, sigue resultando difícil distinguir entre los equivalentes a mis padres, abuelos y bisabuelos de los equivalentes a mis tíos y tías, respectivamente. El hecho de que dos fósiles posean dientes o mandíbulas similares no significa que compartan una historia evolutiva reciente. Estas coincidencias pueden suceder porque un mismo nicho ecológico genera soluciones morfológicas parecidas. A modo de ilustración, piénsese en el diseño de un hacha que funciona tan bien para talar eucaliptos en Australia como abetos en el norte de Europa. Los australianos y los europeos podrían haber desarrollado el mismo diseño sin necesidad de que un grupo lo introdujera en el otro. También sabemos que la morfología no puede cambiar de forma ilimitada. Para cualquier tipo de animal o planta hay un número finito de soluciones anatómicas o fisiológicas ante el mismo desafío ecológico. De ahí que el descubrimiento de un rasgo compartido en dos especies fósiles no implica una relación taxonómica directa entre ambas. Podrían corresponder a parientes cercanos que hubieran desarrollado una misma solución física ante unas circunstancias ecológicas similares.

Entonces, ¿cómo identificaremos en el futuro nuestros antepasados directos? Además de apoyar la idea de que numerosas especies de homininos recorrían el planeta al mismo tiempo, me atrevo a ir un paso más allá. Preveo que se demostrará que la elevada diversidad de homininos descrita para los últimos cuatro millones de años se extiende aún más en el pasado. En parte, porque todavía no se han dedicado tantos esfuerzos a buscar fósiles de homininos de épocas anteriores. Sobre todo se han explorado yacimientos de hace menos de cuatro millones años. Es cierto que la tarea no resulta fácil. Los homininos constituyen una de las especies de mamíferos más escasas en el registro fósil. Deben desenterrarse un sinfín de huesos de cerdos y antílopes antes de poder descubrir uno de hominino. Pero con un esfuerzo coordinado podrían salir más a la luz.

Otra razón me hace pensar que quedan más especies de homininos primitivos por descubrir: el registro fósil de los mamíferos más comunes presenta tantos linajes anteriores a los tres millones de años como posteriores a esa fecha. ¿Por qué no cabría esperar un patrón similar en los homininos? Por último, los yacimientos de los primeros homininos que se conocen cubren menos del 3 por ciento de la superficie terrestre de África. Es muy poco probable que con una muestra geográfica tan reducida hayamos obtenido datos de todas las especies primitivas de homininos que vivieron en el continente.

Aun así, puede que cada nuevo hallazgo de un fósil de más de cuatro millones años de antigüedad nos traiga más incertidumbre. Cuanto más nos acercamos a la separación entre los linajes de los humanos y los de chimpancés y bonobos, más nos costará saber si se trata de un ancestro directo o de un pariente cercano. También resultará más difícil de interpretar si una especie nueva corresponde a un hominino o a un antepasado de los chimpancés y bonobos, o incluso si pertenece a un linaje sin representantes vivos. Si la paleoantropología plantea hoy retos formidables, sin duda en el futuro deberá encarar aún más. De hecho, todavía no estoy convencido de que los esqueletos de Malapa perteneciesen a antepasados directos de los humanos. Pero es precisamente este tipo de obstáculos los que hacen tan fascinante esta disciplina.

PARA SABER MÁS

Fossils raise questions about human ancestry. Ewen Callaway en *Nature*. Publicado en línea el 8 de septiembre de 2011.
What does it mean to be human? Programa de los Orígenes Humanos del Instituto Smithsoniano: **http://humanorigins.si.edu**

EN NUESTRO ARCHIVO

Evolución humana. VV. AA. Colección TEMAS de *IyC* n.º 44, 2006.
Una historia intrincada. Katherine Harmon en *IyC*, abril de 2013.
Cincuenta años de *Homo habilis*. Bernard Wood en *IyC*, octubre de 2014.

CAMBIOS CLIMÁTICOS Y EVOLUCIÓN HUMANA

La alternancia entre paisajes húmedos y secos favoreció que algunos de nuestros ancestros adoptaran rasgos más modernos y que otros se extinguieran

Peter B. deMenocal

EN SÍNTESIS

Los cambios ambientales comienzan a verse como uno de los factores que modelaron la evolución humana. Varias investigaciones recientes indican que la extinción de algunos de nuestros ancestros y el éxito de otros coincidieron con ciertas alteraciones climáticas.

El estudio del suelo africano, de los sedimentos marinos y de la dentadura fósil de nuestros antepasados revela una rápida alternancia entre ambientes húmedos y secos, así como dos períodos en los que las praderas herbáceas reemplazaron a las áreas boscosas.

Tales alteraciones climáticas podrían haber contribuido al éxito de *Homo*. Nuestro género se habría beneficiado de una dieta variada, de su capacidad para fabricar herramientas y de la notoria facultad humana para adaptarse al cambio continuo.



N MI ASCENSO POR LA ESCARPADA ORILLA DE UN PEQUEÑO barranco cercano a la orilla del lago Turkana, en el norte de Kenia, hago un alto en una loma. Desde ella se divisa un vasto paisaje desértico. El color jade azulado de las relucientes aguas contrasta con el marrón rojizo de los alrededores. Este estrecho y alargado mar, enclavado en el Gran Valle del Rift, debe su existencia al serpenteante río Omo, que vierte en él la escorrentía de las lluvias monzónicas estivales caídas en el altiplano etíope, cientos de kilómetros al norte. El calor impone respeto. El sol cae a plomo sobre el ardiente suelo rocoso. Al otear el polvoriento horizonte y ver el lago titilar en la distancia, me cuesta pensar que este paisaje no siempre fue un desierto.

Sin embargo, las pruebas de un tiempo pasado mucho más húmedo se hallan por doquier. Sin ir más lejos, el pequeño repecho bajo mis pies está formado por una gruesa capa de sedimentos lacustres de 3,6 millones de años de antigüedad, cuando un Turkana mucho más extenso y profundo colmaba la cuenca. Los fósiles de peces abundan y los restos cristalinos de algas conforman capas de arena blanca. En el pasado, las praderas, los árboles y los lagos tapizaban lo que hoy no es más que un desierto de roca.

Cada vez más científicos creen que los cambios climáticos como el que acabamos de describir desempeñaron un papel clave en la evolución de nuestra especie. En la región del lago Turkana, así como en otros yacimientos del este y el sur

EL LAGO TURKANA, situado entre dos desiertos de África oriental, ha crecido y desaparecido en decenas de ocasiones. Mientras eso ocurría, nuestros antepasados evolucionaban en la misma zona.

de África, se encuentra la mayor parte del registro fósil correspondiente a los primeros estadios de la evolución humana y la trayectoria que siguió cuando, hace unos siete millones de años, nuestro linaje se separó del de los simios africanos.

Los datos muestran que algunas de las grandes variaciones que ha sufrido el clima del continente coincidieron con dos acontecimientos clave de nuestra historia evolutiva. El primero tuvo lugar hace entre 2,9 y 2,4 millones de años, cuando el linaje de la famosa Lucy, *Australopithecus afarensis*, se extinguió y aparecieron dos grupos bien diferenciados. Uno ya dejaba entrever algunos rasgos modernos, como un mayor volumen cerebral; sus representantes no eran otros que los miembros más antiguos de *Homo*, nuestro género, y junto a sus fósiles se han hallado las primeras herramientas de piedra sin tallar. El segundo grupo mostraba un aspecto distinto. Con una complexión fuerte, mandíbulas robustas y conocido con el nombre colectivo de *Paranthropus*, acabaría extinguiéndose.

El segundo gran acontecimiento llegó en torno a un millón de años después. Hace entre 1,9 y 1,6 millones de años apareció una especie más carnívora y dotada de un cerebro aún mayor: *Homo erectus*, también conocido como *Homo ergaster*. Su esqueleto, más alto y característico de un individuo más ágil, apenas podía distinguirse del de los humanos actuales. Aquella especie fue también la primera en abandonar África y poblar el sudeste asiático y Europa. Al mismo tiempo, la técnica lítica mejoró de manera notable y surgieron las primeras hachas de mano con grandes hojas cuidadosamente talladas por ambos lados.

¿Por qué esos hitos evolutivos, augurios de la humanidad actual, se encuentran tan próximos en el tiempo? Algunos expertos creen que la causa podría residir en dos episodios de cambio climático. Tales impactos ecológicos, ocurridos tras prolongados períodos en los que el cambio había sido gradual, habrían desplazado la cuna de la humanidad hacia praderas cada vez más secas y abiertas. Mientras esos episodios tenían lugar, el clima experimentó acusadas fluctuaciones entre períodos secos y húmedos, variaciones bruscas a las que nuestros ancestros hubieron de adaptarse para sobrevivir.

Las pruebas al respecto proceden de una serie de datos sobre el clima y la vegetación africanos. Hoy en día, disponemos de técnicas que permiten extraer y analizar restos moleculares de vegetación ancestral a partir de estratos sedimentarios como los del lago Turkana. Al mismo tiempo, los análisis químicos de la dentadura de nuestros ancestros nos han permitido conocer de qué se alimentaban a medida que el paisaje se transformaba. Esos datos muestran que las criaturas que supieron adaptarse al cambio, las más flexibles en lo referente a la dieta y al hábitat, fueron las que prosperaron. Esa flexibilidad frente a alteraciones ambientales bruscas parece constituir uno de los rasgos que han acompañado al linaje humano durante su historia evolutiva. Rick Potts, paleoantropólogo de la Institución Smithsoniana, ha puesto nombre al papel que ha desempeñado la flexibilidad a la hora de convertirnos en lo que somos: «selección por variabilidad».

LA VIDA Y EL CLIMA

El vínculo entre cambios climáticos y evolución se remonta a Charles Darwin. Según él, las variaciones climáticas podían modificar el alimento, el refugio y otros recursos disponibles en una región determinada. La desaparición de un alimento predilecto o la sustitución de un período húmedo por otro seco generaría así una presión que conduciría, en última instancia, a la adaptación, la extinción o la evolución hacia una especie diferente. El medio, regido por el clima, favorecería a aquellos individuos con rasgos hereditarios ventajosos, como un cerebro mayor. En *El origen de las especies*, Darwin ya señalaba que los períodos de sequía y frío extremo constituirían mecanismos muy efectivos en el control del número de especies.

Pero los cambios no siempre son graduales o moderados. Las cinco extinciones masivas que jalonan el registro fósil de los últimos 540 millones de años de vida sobre la Tierra han venido acompañadas de grandes alteraciones en el medio. En cada una de ellas sucumbió entre el 50 y el 90 por ciento de las especies, y a todas siguió una explosión de nuevas formas de vida muy diferentes. Esos episodios definen los principales capítulos del libro de la vida en nuestro planeta. Nosotros, los mamíferos, debemos estar inmensamente agradecidos al gigantesco meteorito que hace 66 millones de años se estrelló contra la península de Yucatán. Aquel impacto causó la extinción de los dinosaurios —así como la de otras muchas especies menos carismáticas— y dejó la pista libre a nuestra rápida expansión y diversificación.

Tras un larguísimo período en el que se sucedieron las ramificaciones, un grupo de aquellos mamíferos dio lugar a la línea de la que procedemos los humanos. En lo que se respecta a los homininos (el grupo que incluye al ser humano moderno y a sus parientes extintos más próximos) se han propuesto diversas teorías sobre el modo en que el ambiente pudo haber condicionado su evolución. Una de ellas recibe el nombre de «hipótesis de la sabana». En una de sus primeras versiones, planteaba que nuestros primeros ancestros, con una bipedestación creciente, un cerebro voluminoso y dotados de la facultad para fabricar herramientas, se encontraban mejor adaptados para expandirse por la sabana, donde la competición por los recursos era más feroz. Nuestros antepasados simiescos habrían quedado así relegados al ambiente boscoso, cada vez más exiguo.

Sin embargo, esa explicación —que aún puede verse en algunos libros de texto— es incorrecta. La transición del bosque a la pradera no se produjo en un solo paso, sino en una rápida sucesión de ciclos húmedos y secos que, a lo largo de distintas etapas, evolucionó hacia condiciones cada vez más áridas. Tampoco adquirimos nuestros rasgos humanos de repente, sino a lo largo de una serie de cambios bruscos que coincidieron, precisamente, con alteraciones ambientales.

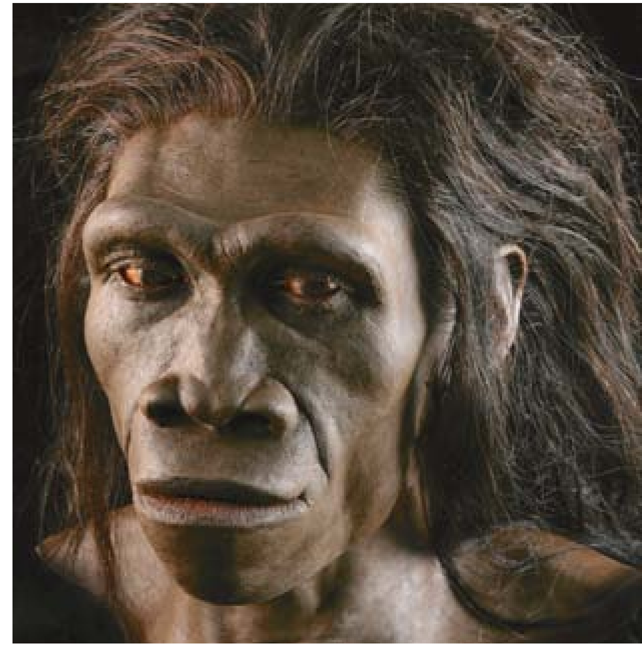
CICLOS HÚMEDOS Y SECOS

Las pruebas de cambios bruscos en el medio y en nuestro desarrollo evolutivo no solo proceden de la tierra, sino también del mar. Debido a la erosión y a otras alteraciones geológicas, los sedimentos terrestres africanos pueden resultar difíciles de estudiar. En el océano profundo, sin embargo, permanecen


Peter B. deMenocal es profesor en el departamento de ciencias de la Tierra y ciencias ambientales del Observatorio Terrestre Lamont-Doherty, perteneciente a la Universidad de Columbia. Fue uno de los autores del informe *Understanding climate's influence on human evolution*, elaborado por el Consejo Científico Nacional estadounidense.

PÁGINAS ANTERIORES: MICHAEL POLIZA/*NATIONAL GEOGRAPHIC*





DIETA PRIMITIVA: ***Paranthropus boisei*** **(*izquierda*), un ancestro distante, vivía en llanuras abiertas. El análisis químico de su dentadura ha revelado que se alimentaba principalmente de plantas herbáceas o similares. En el mismo ambiente, sin embargo, *Homo erectus* (*derecha*), en ocasiones también llamado *Homo ergaster*, adoptó una dieta más variada. Esa flexibilidad pudo haber favorecido su éxito evolutivo.**

inalterados. Al perforar el fondo marino en las proximidades de la costa africana, los geólogos hemos podido remontarnos millones de años atrás gracias a la extracción de largos testigos de sedimentos. Obtenerlos requiere buques especiales, razón por la que, en otoño de 1987, me embarqué con un equipo de 27 expertos a bordo del *JOIDES Resolution*, un navío internacional de más de 140 metros.

«¡Testigo a bordo!», voceaba por megafonía el perforador. Al oírlo refunfuñábamos, nos calábamos nuestros sombreros para protegernos del sol cegador de Arabia, abandonábamos nuestros frescos y cómodos laboratorios y salíamos a buscar otra columna de 9 metros de sedimentos oceánicos. Durante aquella expedición, perforamos estratos de sedimentos en el mar de Arabia a lo largo de unos 2,5 kilómetros y obtuvimos testigos de hasta casi 800 metros de profundidad bajo el fondo marino. Desde que los linajes de los grandes simios y el del ser humano divergiesen, hace varios millones de años, el fondo oceánico de la zona había acumulado casi 300 metros de barro, a razón de algo menos de 4 centímetros por milenio.

Tales sedimentos se componen de una mezcla de un material blanco de grano fino, correspondiente a conchas fósiles de carbonato de calcio procedentes del antiguo plancton oceánico, y unos granos limosos más oscuros transportados desde África y Arabia por vientos monzónicos. Una mezcla de aspecto oscuro y arenoso indica temporadas secas y polvorientas. En caso de mostrar tonalidades claras, revela condiciones más húmedas. Al examinar los testigos, comprobamos que la alternancia entre capas claras y oscuras se repetía cada 90 centímetros; es decir, cada 23.000 años. Quedaba así claro que la historia del clima africano se caracterizaba por continuas fluctuaciones entre períodos húmedos y secos, no por una única progresión hacia la sabana.

Semejantes alteraciones reflejaban la conocida sensibilidad del clima monzónico africano y asiático a las ligeras variaciones que, con un ciclo de 23.000 años, experimenta la órbita terrestre. Estas modifican la cantidad de radiación solar que incide sobre nuestro planeta en una región y estación dadas. En el caso del norte de África y el sur de Asia, un mayor o menor aporte de calor durante el verano implica un aumento o disminución de las precipitaciones, lo que provoca que esas zonas se tornen, respectivamente, más húmedas o más secas.

Hasta qué punto se volvió húmedo el clima norteafricano ha quedado registrado en magníficas pinturas rupestres de hace entre 5000 y 10.000 años, época del último período húmedo en la región. Varias pinturas descubiertas en el Sáhara muestran paisajes verdes repletos de elefantes, hipopótamos, jirafas, cocodrilos y cazadores persiguiendo gacelas. Lo que hoy es un desierto se encontraba entonces cubierto de hierba y árboles; las cuencas lacustres, ahora sepultadas por las dunas, se hallaban repletas de agua. Un caudaloso río Nilo desembocaba en el Mediterráneo oriental. Ello provocó la acumulación de sapropel, un sedimento oscuro rico en materia orgánica. Este se alterna con las capas de color claro depositadas en los períodos más secos: un código de barras que, al igual que las capas de polvo del mar Arábigo, narra los ciclos climáticos de África y nos adentra en un pasado remoto.

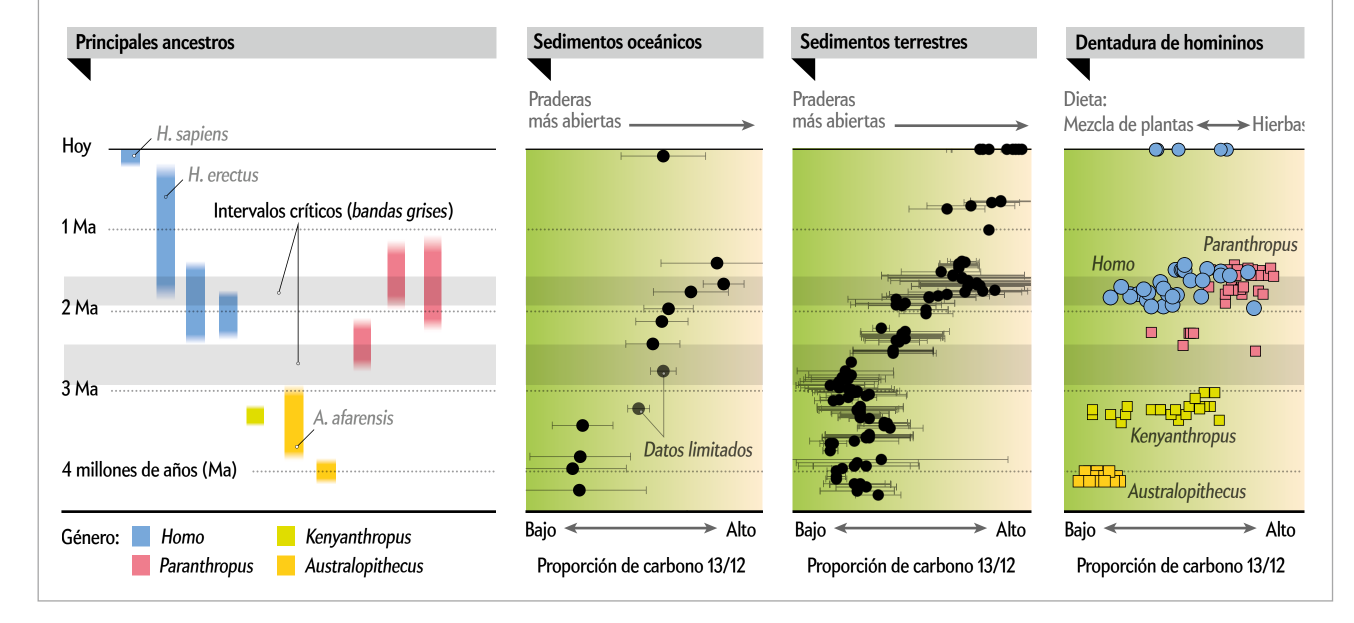
EL FIN DE LUCY

Al mismo tiempo que se sucedían los ciclos húmedos y secos provocados por las variaciones de la órbita terrestre, tuvo lugar una progresión más gradual hacia un paisaje de praderas secas y abiertas. Aunque las primeras zonas de este tipo brotaron en África oriental hace unos ocho millones de años, las extensas praderas de hierba, como las del Serengeti, no se constituyeron hasta hace tres millones de años. Justo en aquel momento, nuestra historia evolutiva cambió de manera sustancial.

Primero perdimos a Lucy. Su otrora exitosa especie, *Australopithecus afarensis*, había sobrevivido en África oriental durante

Clima de cambio

Hay dos momentos de nuestra historia evolutiva que apuntan a una sugerente conexión entre las variaciones climáticas y la supervivencia y extinción de varios miembros de nuestro árbol genealógico. Hace unos tres millones de años, *Australopithecus afarensis* desapareció y surgieron los grupos *Paranthropus* y *Homo*. Durante dicho período, la composición isotópica del carbono observada en sedimentos oceánicos y terrestres indica que, mientras los bosques retrocedían, las praderas secas se extendieron con rapidez. Hace poco menos de dos millones de años apareció y salió de África *Homo erectus*, uno de nuestros ancestros directos. Los análisis de carbono indican que, también entonces, las praderas experimentaron una gran expansión. Por último, el carbono hallado en dentaduras de *H. erectus* revela una dieta mixta, lo que reflejaría su capacidad para buscar alimento en distintos ambientes aun cuando las praderas se extendían. Por el contrario, las dentaduras de *Paranthropus* indican que este grupo, al igual que el también extinto *Kenyanthropus*, restringió su alimentación a la vegetación de las praderas.



900.000 años desde su aparición, hace 3,8 millones de años. Sin embargo, el registro fósil nos dice que sus integrantes desaparecieron hace poco menos de tres millones de años. Poco después surgió el grupo *Paranthropus*, al que siguieron los primeros indicios de hachas y raspadores de piedra, datados en unos 2,6 millones de años de antigüedad. Los primeros fósiles de *Homo* se remontan a pocos cientos de miles de años después.

Hoy sabemos que esa transición en nuestro árbol genealógico y en el desarrollo técnico coincidió con un período en el que el clima cambió de manera más general. Semejante conclusión ha sido posible gracias a un brillante ejercicio detectivesco, consistente en seguir el rastro de las plantas que crecían en ambientes húmedos y secos.

Las sabanas constituyen ecosistemas tropicales abiertos compuestos por hierbas, juncos y, en ocasiones, salpicados por árboles leñosos. Su hierba se encuentra bien adaptada a las regiones cálidas y secas gracias a que absorbe el carbono atmosférico por una ruta fotosintética específica: la vía C4. Las reacciones químicas que la caracterizan tienden a consumir menos carbono y agua, lo que resulta beneficioso en ambientes secos y pobres en CO_2. Por el contrario, los árboles y otras plantas leñosas requieren ecosistemas más húmedos. Ello se debe a que recurren a la vía fotosintética C3, la cual necesita más agua.

Thure E. Cerling, de la Universidad de Utah, y sus colaboradores han desarrollado un método para reconstruir la historia vegetal de ambientes remotos. Hace unos años, descubrieron que las plantas herbáceas C4 presentaban una mayor proporción de carbono 13 frente a carbono 12 que los arbustos y plantas leñosas del tipo C3. En estas últimas, la misma proporción de isótopos resulta menor. Así pues, los investigadores se percataron de que podían tomar muestras de suelo o nódulos de roca de un ambiente y época dados, analizar la proporción isotópica del carbono y, a partir de ella, derivar con precisión el porcentaje de vegetación herbácea C4 frente al de plantas leñosas C3 presentes en aquel momento y lugar.

Al analizar los sedimentos de las zonas de África oriental donde se habían encontrado fósiles de homininos, hallaron que, hasta hace ocho millones de años, el paisaje estuvo dominado por bosques y campos de arbustos C3. A partir de entonces, sin embargo, la proporción de praderas de hierba C4 comenzó a aumentar.

Hace entre tres y dos millones de años tuvo lugar un cambio rápido y de magnitud considerable. Las extensiones de hierba se expandieron por lo que hoy es Kenia, Etiopía y Tanzania. Ello derivó en un aumento de la proporción de animales de pasto, tal y como evidencia el abundante registro fósil. Hace poco más de dos millones de años, los antílopes africanos —cuyos cuernos, bien preservados, muestran toda una variedad de formas indicativas de diferentes especies— experimentaron una amplia especiación, extinción y adaptación. Lo mismo ocurrió con nuestros antepasados homininos. Sin embargo, los bóvidos dan cuenta de un tercio de los fósiles africanos, por lo que su estudio aporta muchos más datos que el de los escasos restos de homininos.

Elisabeth Vrba, paleontóloga de la Universidad Yale, ha efectuado un análisis panafricano de la evolución de los bóvidos

FUENTE: PETER deMENOCAL

durante los últimos seis millones de años. Su estudio ha identificado períodos muy concretos en los que la velocidad de especiación y extinción se encontraba muy por encima del nivel de referencia. Los dos eventos más pronunciados ocurrieron hace unos 2,8 y 1,8 millones de años, justo la época en que los geólogos han inferido un rápido crecimiento de las praderas, si bien las investigaciones recientes de René Bobe, hoy en la Universidad George Washington, y Anna K. Behrensmeyer, de la Institción Smithsoninana, indican que tales episodios podrían haber sido más moderados. La anatomía de los fósiles muestra que algunas especies sacaron provecho del cambio de paisaje. Por ejemplo, aparecieron numerosos bóvidos aptos para el pastoreo, con molares bien adaptados a una dieta herbácea y abrasiva.

DIETA Y AMBIENTE

Al igual que en el caso de los bóvidos, aquel cambio en la vegetación ejerció con toda probabilidad un efecto profundo sobre nuestros ancestros. Al respecto, las investigaciones sobre la dieta de nuestros antepasados se han revelado como una valiosa fuente de información. Del mismo modo que los isótopos presentes en el suelo nos permiten deducir la abundancia relativa de praderas en un entorno remoto, los expertos han comenzado a estudiar la composición isotópica de la dentadura de nuestros ancestros. El análisis del carbono contenido en la dentadura de un estadounidense contemporáneo, por ejemplo, lo asociaría sin lugar a dudas con las hierbas C4, ya que gran parte de su dieta (vacuno, refrescos, aperitivos, dulces) deriva en última instancia del maíz, una planta de tipo C4.

Las modificaciones en la dieta parecen formar parte del segundo hito evolutivo de nuestra historia, ocurrido hace unos dos millones de años y al que se remontan los primeros fósiles de *Homo* con un aspecto más moderno. Tras analizar dentaduras fósiles halladas en la cuenca del lago Turkana, Cerling y su equipo publicaron el año pasado un notable estudio que demostraba que, hace justo unos dos millones de años, tuvo lugar una divergencia dietética entre los primeros miembros de *Homo* y los integrantes del grupo *Paranthropus*, de grandes mandíbulas. Una especie, *Paranthropus boisei*, ha recibido con frecuencia el apodo de Hombre Cascanueces debido al impresionante tamaño de sus molares y a sus enormes mandíbulas. El análisis isotópico de su dentadura apunta a una dieta basada sobre todo en plantas C4. Sin embargo, la presencia de finas estrías microscópicas en las piezas dentales indica que no cascaba nueces en absoluto, sino que se alimentaba de hierbas y arbustos.

La gran sorpresa llegó con *Homo*. Sus primeros representantes siguieron una dieta que contrasta con el paisaje de la época, tendente a cubrirse de plantas C4. El análisis isotópico de su dentadura revela una alimentación asombrosamente mixta, con proporciones de en torno al 65 y 35 por ciento de plantas C3 y C4. Así pues, *Homo* buscaba distintos alimentos en un paisaje cada vez más uniforme. Los primeros *Homo* adoptaron una dieta variada y flexible, y sus genes han llegado hasta nosotros. *Paranthropus*, que ocupó un nicho dietético muy estricto de plantas de tipo C4, acabó extinguiéndose.

Resulta tentador especular con la posibilidad de que las herramientas complejas que vieron la luz junto con esos primeros *Homo* —hachas de mano, machetes y otras cuya elaboración requería un mayor esfuerzo y podían servir a múltiples fines— ayudaron a sus fabricantes a aprovechar toda una variedad de recursos alimenticios. Aún no sabemos a ciencia cierta qué comían; sin embargo, sí conocemos las adaptaciones dietéticas que los condujeron al éxito.

LLENAR LOS HUECOS

A pesar de lo sugerente de la historia anterior, esta presenta algunas lagunas; en concreto, huecos de varios miles de años en las secuencias de sedimentos terrestres. Una vez más, sin embargo, podemos recurrir al registro marino, en el que una prometedora técnica desarrollada durante la última década permite trazar de manera continua los cambios de vegetación.

Todas las plantas terrestres presentan en sus hojas una película cérea que las protege de posibles daños y de la deshidratación. Cuando mueren o se deterioran, el viento transporta esa película junto con el polvo y otras partículas. Dicho recubrimiento se compone de lípidos, moléculas que no solo resisten la degradación, sino que reflejan la composición isotópica representativa de las plantas C3 y C4. Una vez separados de los sedimentos por medios químicos, esos lípidos de ceras vegetales pueden analizarse. La abundancia relativa de un tipo particular nos permite deducir qué proporción de hierba frente a árboles y arbustos reinó en el pasado.

Gracias a dicha técnica, Sarah J. Feakins, de la Universidad de California del Sur, ha reconstruido el medio en que habitaron los homininos. A partir de sedimentos procedentes del golfo de Adén, entre Somalia y la península arábiga, ha confirmado que las praderas de África oriental se expandieron hace entre tres y dos millones de años, llegando a aumentar su tamaño en tal vez un 50 por ciento. Feakins halló también que los biomarcadores de cera vegetal variaban conforme a los cambios rápidos producidos por los ciclos orbitales y los monzones. Las praderas y los bosques avanzaban y retrocedían de acuerdo a esa escala de tiempo, más corta, y buena parte de las alteraciones llegaron a alcanzar la misma magnitud que el cambio a largo plazo hacia un paisaje más abierto y formado por plantas herbáceas. En el famoso yacimiento de la garganta de Olduvai, en Tanzania, que fue habitado por homininos hace 1,9 millones de años, Clay Magill y Kate Freeman, de la Universidad de Pensilvania, han registrado variaciones similares de los biomarcadores.

Poco a poco vamos entendiendo mejor el origen de nuestra especie. Atrás queda la vieja imagen en la que nuestros ancestros emergían de un oscuro y remoto bosque para dominar las praderas. En su lugar, disponemos de pruebas que apuntan a una serie de ciclos climáticos rápidos y a dos grandes cambios que originaron la sabana africana que conocemos hoy. Los más exitosos de nuestros ancestros se beneficiaron de una flexibilidad que les permitió adaptarse a esas alteraciones del medio. Aunque los expertos aún deberán consolidar el vínculo entre clima y evolución, parece que la eterna pregunta acerca de cómo hemos llegado a convertirnos en lo que somos ya no se encuentra fuera de nuestro alcance.

PARA SABER MÁS

Climate and human evolution. Peter B. deMenocal en *Science*, vol. 331, págs. 540-542, febrero de 2011.
Stable isotope-based diet reconstructions of Turkana basin hominins. Thure E. Cerling et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 110, n.º 26, págs. 10.501-10.506, junio de 2013.
Evolution of early *Homo*: An integrated biological perspective. S. C. Antón, R. Potts, L. y C. Aiello en *Science*, vol. 345, págs. 1236828-1-1236828-13, julio de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Qué nos hace humanos? Katherine S. Pollard en *IyC*, julio de 2009.



A GOLPE DE SUERTE

Según las teorías tradicionales, el éxito de nuestros antepasados se debió fundamentalmente a su capacidad para fabricar herramientas. Una revisión de nuestra historia evolutiva añade grandes dosis de suerte a todo el proceso

Ian Tattersall

EN SÍNTESIS

Una nueva teoría considera que la extraordinaria velocidad con que evolucionaron los primeros humanos se debió a una combinación de avances culturales y cambios climáticos impredecibles.

Las repetidas glaciaciones habrían fragmentado las poblaciones de homininos y creado pequeños grupos, en los que los cambios genéticos y culturales se habrían fijado con gran rapidez.

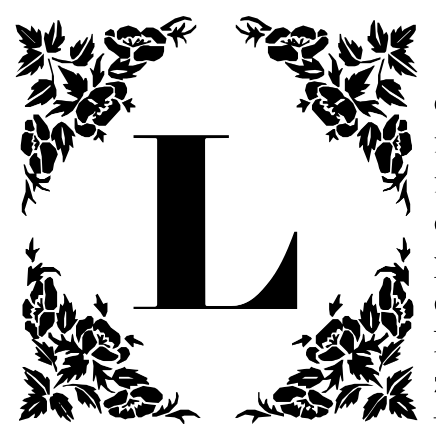
La aparición de *Homo sapiens* en África, hace 200.000 años, se habría debido a un evento de ese tipo. Unos 100.000 años más tarde, una población africana adquirió la capacidad de usar símbolos.

Esa facultad simbólica única fue, casi con seguridad, lo que permitió que nuestros antepasados eliminasen o sobreviviesen al resto de sus competidores homininos en poco tiempo.

CHRISTIAN NORTHEAST



Ian Tattersall es paleoantropólogo y conservador emérito del Museo Americano de Historia Natural, en Nueva York. Su investigación se centra en los homininos y los lémures.



LOS HUMANOS SOMOS PRIMATES muy peculiares. Caminamos erguidos, manteniendo el equilibrio de nuestro pesado cuerpo con ayuda de dos pequeños pies. Nuestra abultada cabeza luce un rostro diminuto y mandíbulas reducidas, engastadas bajo la parte frontal de nuestro globoso neurocráneo. Pero lo más sorprendente tal vez sea la manera en que procesamos la información. Hasta donde sabemos, somos el único organismo capaz de deconstruir mentalmente tanto el mundo exterior como sus experiencias interiores y plasmarlos en símbolos abstractos, los cuales empleamos para generar nuevas versiones de la realidad: no solo podemos describir el mundo tal y como es, sino también imaginar cómo *podría* ser.

Nuestros antepasados nunca fueron tan excepcionales. El registro fósil muestra que, no hace mucho más de siete millones de años, nuestros ancestros eran criaturas simiescas que vivían en los árboles y necesitaban sus cuatro extremidades para desplazarse; tenían un rostro grande y prominente, con poderosas mandíbulas situadas por delante de un modesto neurocráneo. Con toda probabilidad, sus facultades cognitivas equivalían a las de los chimpancés modernos. Aunque se trata sin duda de animales listos, habilidosos y capaces de reconocer símbolos e incluso combinarlos, los simios antropomorfos actuales no parecen capaces de reorganizarlos para crear nuevas realidades. Para convertirse en *Homo sapiens*, aquel antepasado hubo de sufrir múltiples cambios evolutivos en muy poco tiempo.

Puede que siete millones de años parezcan muchos, pero no representan más que un instante para una transformación así. En general, las especies de primates estrechamente emparentadas —y, desde luego, aquellas que pertenecen a un mismo género— no muestran grandes diferencias en sus rasgos físicos ni cognitivos. Además, la vida media de una especie mamífera se estima en unos tres o cuatro millones de años; es decir, la mitad de tiempo durante el que el grupo de los homininos (que nos incluye a nosotros y a nuestros parientes extintos más cercanos) ha existido y se ha transformado hasta quedar irreconocible. Si una historia evolutiva consiste en que unas especies dan lugar a otras, como sabemos que sucede, la tasa de especiación de nuestro linaje tuvo que haberse acelerado de manera muy notable para llegar a experimentar semejante metamorfosis.

¿Por qué en nuestra familia la evolución operó con tal rapidez? ¿Qué mecanismo provocó esa aceleración? Aunque resulte extraño, tales preguntas no son las que más han ocupado a quienes estudian el registro fósil. Casi con seguridad, la respuesta guarda relación con la capacidad de nuestros antepasados para resolver problemas mediante el uso de herramientas líticas, ropa, refugio, fuego y otros elementos que, en conjunto, se conocen con el nombre de «cultura material». Durante largo tiempo, los expertos han mantenido que la selección natural favoreció a aquellos humanos arcaicos con mayor capacidad para innovar y compartir conocimientos. Los individuos más competentes sobrevivieron y se reprodujeron más que el resto, lo que se tradujo en un avance sostenido para todos los homininos.

Por sí solo, sin embargo, ese proceso no habría bastado para remodelar de manera tan radical el linaje humano en siete millones de años. A medida que nuestro conocimiento sobre el clima de los últimos dos millones de años se ha ido ampliando, una nueva imagen ha comenzado a ver la luz. Según esta, varias fluctuaciones climáticas muy acusadas se sumaron a la cultura material para acelerar el ritmo evolutivo de nuestros antepasados. Parece probable que la fabricación de herramientas y otras técnicas ayudasen a los primeros homininos a adentrarse en nuevos ambientes. Sin embargo, cada vez que las condiciones climáticas se tornaban adversas, esos avances ya no bastaban para garantizar la supervivencia. Numerosas poblaciones se disgregaron. Ello permitió que, en algunos de esos grupos más pequeños, los cambios genéticos y la innovación cultural arraigasen mucho más rápido que en una gran comunidad. Otras poblaciones perecieron. Y la especie que en última instancia prevaleció —la nuestra— debe su éxito a factores contingentes, como las fluctuaciones climáticas, tanto como a su talento.

BAJAR DE LOS ÁRBOLES

A pesar de la enorme importancia de la cultura material en la gestación de un fenómeno tan extraordinario como *Homo sapiens*, su aparición tuvo lugar en un momento relativamente tardío. Más de cuatro millones de años antes de que nuestros antepasados aprendiesen a utilizar herramientas, sus ancestros tuvieron que bajar de los árboles y adaptarse a vivir en el suelo, toda una proeza para un simio con cuatro extremidades prensoras. Aquel paso hubo de requerir un simio antropomorfo capaz de mantener su tronco erguido de forma habitual. Y, de hecho, se sabe que esa postura la adoptaron algunos de los primeros



IRRUPCIÓN DEL SIMBOLISMO: Nuestra singular capacidad para el pensamiento simbólico es lo que parece distinguirnos del resto de las especies. Este ocre grabado (*izquierda*), procedente de la cueva de Blombos (*abajo*), en Sudáfrica, es uno de los restos más antiguos conocidos que reflejan claramente dicha facultad. La regularidad del trazado lleva a pensar que codificaba algún tipo de información.



JOHN READER, *SCIENCE SOURCE*

hominoideos (miembros de la superfamilia a la que pertenecen los simios antropomorfos y los homininos).

El origen de nuestra alterada anatomía puede retrotraerse al hecho de haber bajado de los árboles. Pero, aunque también sirvió como punto de partida para otras adaptaciones posteriores, no aceleró el ritmo evolutivo de los acontecimientos. Durante los cinco primeros millones de años, los homininos evolucionaron de forma muy parecida a cualquier otro grupo de primates con éxito. Al principio, el árbol genealógico humano era frondoso, con numerosas especies coetáneas que tanteaban el potencial que ofrecía caminar de pie. Pero aquellos primeros experimentos no propiciaron ninguna transformación profunda: en términos de dónde y cómo vivían, todos los homininos de aquel período parecen variaciones de un mismo esquema básico. En su calidad de criaturas a medio camino entre los árboles y hábitats más abiertos, aquellos ancestros conservaron un cerebro y un cuerpo moderados y proporciones corporales primitivas: piernas cortas y brazos dotados de gran movilidad.

La tasa evolutiva solo empezó a acelerarse de manera drástica con la aparición del género *Homo*, hace unos de dos millones de años. Sin embargo, la cultura material había aparecido en forma de herramientas líticas al menos medio millón de años antes. Esa circunstancia apoya con fuerza la idea de que la cultura alimentó la rápida transformación que hizo que una sucesión estable de simios antropomorfos arborícolas se convirtiese en un linaje humano que vivía en el suelo y evolucionaba con rapidez. En África se han hallado útiles de piedra rudimentarios de 2,6 millones de años e indicios aún más antiguos de marcas de herramientas en huesos de animales. Casi con seguridad, fueron los homininos primitivos quienes fabricaron estos útiles simples: pequeñas lascas afiladas extraídas de núcleos de piedra del tamaño de un puño.

A pesar de su anatomía arcaica, aquellos primeros fabricantes de herramientas ya habrían superado con mucho las capacidades cognitivas de los simios antropomorfos. Ni siquiera con ayuda de un intenso entrenamiento aprenden los simios antropomorfos actuales a golpear intencionadamente una piedra contra otra para obtener una lasca. Estas se empleaban en el despiece de los cadáveres de mamíferos pastadores. Semejante comportamiento, totalmente novedoso, implica que la dieta de los homininos se amplió de repente. De ser fundamentalmente vegetariana, pasó a incorporar grasas y proteínas animales (si bien se desconoce si aquellos individuos se alimentaban de carroña o practicaban la caza activa). A la postre, esa dieta más rica acabaría permitiendo el rápido crecimiento del cerebro ávido de energía que caracteriza a *Homo*.

Aunque los biólogos debaten con fervor sobre qué fósiles corresponden a las primeras encarnaciones de *Homo*, coinciden en que los primeros homininos con proporciones corporales similares a las nuestras aparecieron hace menos de dos millones de años. Hacia la misma época, los homininos abandonaron África y se dispersaron por el Viejo Mundo. Aquellos individuos ya caminaban erguidos y con largas zancadas, vivían en sabanas abiertas, lejos de la protección del bosque, y casi con seguridad disfrutaban de una dieta rica en recursos animales. El cerebro de los primeros miembros de *Homo* era apenas algo mayor que el de los primeros bípedos. Hace un millón de años, sin embargo, su volumen se había doblado, y hace 200.000 volvió a duplicarse.

¿CARRERA ARMAMENTÍSTICA EN EL HIELO?

Esta tasa de incremento cerebral resulta asombrosa desde cualquier punto de vista. Ha sido identificada en al menos tres linajes independientes de *Homo*: el que condujo a *Homo neanderthalensis* en Europa, el de los últimos *Homo erectus* en Asia oriental, y el de *Homo sapiens* en África. Esas tendencias paralelas indican, por un lado, que un cerebro voluminoso proporcionaba una ventaja adaptativa; por otro, que el aumento de masa encefálica no fue exclusivo del linaje que culminó en *Homo sapiens*, sino algo común en el género *Homo*. Tal vez esa tendencia insinúe algún tipo de carrera armamentística, ya que la adopción de armas arrojadizas hizo que, para cada uno de esos grupos humanos, los depredadores más peligrosos fuesen otras comunidades humanas con las que habían de competir por los recursos.

La explicación tradicional del rápido aumento encefálico de los homininos, apoyada por los psicólogos evolucionistas,

recibe el nombre de coevolución genética-cultural. Esta implica una acción continua de la selección natural sobre generaciones sucesivas, así como una intensa retroalimentación positiva entre la innovación cultural y la biológica. A medida que los individuos con un cerebro mayor prosperaban generación tras generación, la población en conjunto se tornaba más inteligente; como consecuencia, desarrollaba mejores técnicas y herramientas, lo que contribuía a una adaptación aún mejor. Según este modelo, la interacción entre genes y cultura actuó sobre un linaje de especies que se iba transformando de manera gradual. Ello habría aumentado la inteligencia y la complejidad conductual de nuestros antepasados y los habría predispuesto a evolucionar con rapidez.

No obstante, si reflexionamos un momento, nos veremos obligados a concluir que tuvo que ocurrir algo más. Uno de los problemas de ese escenario radica en que presupone un conjunto de estreses adaptativos constantes a lo largo de extensos períodos de tiempo. Pero *Homo* evolucionó en una época en la que se sucedieron las glaciaciones: ciclos en los que el casquete polar del hemisferio norte se extendía hasta lo que hoy es el norte de Inglaterra y en los que las regiones tropicales se tornaban extremadamente áridas. En medio de tales inestabilidades, no pudo existir una presión selectiva constante que apuntase siempre en la misma dirección. Cuanto más aprendemos sobre esas oscilaciones climáticas, más evidente resulta hasta qué punto hubo de ser inestable el ambiente en que evolucionaron nuestros antepasados. Los sondeos efectuados en los casquetes polares y en el fondo oceánico revelan que las fluctuaciones entre las épocas de frío extremo y las de temperatura suave se intensificaron hace unos 1,4 millones de años. Por tanto, los homininos habrían tenido que reaccionar con gran frecuencia a esos cambios abruptos.

Otro problema de la explicación tradicional radica en los restos materiales que han llegado hasta nosotros. Estos no reflejan un aumento paulatino de la complejidad técnica durante los últimos dos millones de años. En su lugar, sugieren que la innovación tuvo lugar de forma muy esporádica. Los nuevos tipos de herramientas parecen haber aparecido en momentos puntuales separados entre sí cientos de miles o incluso un millón de años; entre medias, solo se observan ligeros retoques de los útiles ya existentes. Los homininos de este período parecen haber reaccionado a los cambios ambientales dando nuevos usos a herramientas viejas, más que inventando otras.

La idea de una evolución gradual se enfrenta también a la falta de pruebas que indiquen que las capacidades cognitivas de los homininos fueron aumentando de manera gradual. Aun cuando surgía una nueva especie de *Homo* con un encéfalo mayor, las técnicas y los modos de vida antiguos se mantenían. La innovación se daba de manera intermitente y no solía coincidir con la aparición de una nueva especie, sino que tenía lugar durante la vida evolutiva de las que ya existían. De hecho, la primera prueba incuestionable de una mente simbólica moderna data de muy tarde, y sugiere que esta nació de forma bastante repentina. Los objetos claramente simbólicos más antiguos —dos placas de ocre pulidas con grabados geométricos, halladas en la cueva de Blombos, en Sudáfrica— se remontan a hace 77.000 años; es decir, a mucho después de que el ser humano anatómicamente moderno entrase en escena, hace unos 200.000 años. Dado que dichos grabados exhiben una gran regularidad, los investigadores creen que codificaban algún tipo de información. Un logro tan repentino no casa bien con un avance intelectual progresivo generación tras generación.

CRONOLOGÍA

Historia de la innovación

El grupo de los homininos, al cual pertenecemos los humanos, ha sufrido grandes transformaciones anatómicas, conductuales y cognitivas durante los últimos 4 millones de años. Al principio de ese período ya habían comenzado a bajar de los árboles. Hace unos 2,6 millones de años aparecieron las primeras herramientas de piedra; las marcas de corte halladas en huesos de mamíferos sugieren que habían comenzado a desmembrar cadáveres incluso antes, lo que condujo a una dieta que cada vez incluía más proteínas animales. En último término, ese cambio en la alimentación impulsó el rápido aumento de masa encefálica que tuvo lugar después de que apareciesen los primeros representantes de *Homo*, hace unos 2 millones de años.

EL POTENCIAL DE UNA COMUNIDAD PEQUEÑA

Parece claro que, para explicar la rápida transformación de los homininos durante las glaciaciones, hemos de mirar más allá de los procesos evolutivos que operan en un linaje dado. Con todo, no tenemos por qué dejar de lado los factores en los que se basa el modelo de coevolución genética-cultural: las presiones ambientales y la cultura material. Simplemente, estos se habrían conjugado de un modo distinto. Para entender la manera en que tales agentes pudieron haber desencadenado el rápido cambio evolutivo, hemos de tener en cuenta que, para que una población adopte una innovación sustancial —ya sea genética o cultural—, su tamaño debe ser reducido. Las comunidades grandes y muy densas arrastran demasiada inercia genética, lo que les impide cambiar de manera constante en una misma dirección. Los grupos pequeños y aislados, en cambio, desarrollan diferencias mucho más a menudo.

En la actualidad, la población humana es sedentaria, gigantesca y se extiende por todas las áreas habitables del planeta. Pero, en la época de las glaciaciones, los homininos eran cazadores y recolectores nómadas, que dependían de la generosidad de la naturaleza y que ocupaban zonas muy escasas y dispersas del Viejo Mundo. Los bandazos de temperatura y humedad, e incluso las fluctuaciones en el nivel del mar y de los lagos, influían de manera muy acusada sobre los recursos disponibles en cada zona, alteraban la vegetación y desplazaban a los animales. Cuando eso

Marcha a grandes pasos

Aparición del género *Homo*

Aparición de *Homo sapiens*

2 ma | 1 ma | Presente

Aparición de herramientas más avanzadas (como hachas de mano)

Los homininos ya recurren de manera habitual al fuego, la ropa y la construcción de refugios

Primeras pruebas de comportamiento simbólico, surgido en África hace entre 100.000 y 80.000 años

Tamaño cerebral de los primeros homininos

El volumen del cerebro se duplica

El volumen del cerebro se duplica de nuevo

PORTIA SLOAN ROLLINGS

ocurría, una región podía tornarse hostil o incluso inhabitable hasta que las condiciones volviesen a mejorar.

Los homininos que vivieron hace entre uno y medio millón de años disponían de un abanico de técnicas —desde fabricar herramientas hasta construir refugios o cocinar— que les habría permitido trascender las limitaciones puramente fisiológicas y explotar el medio de forma más eficiente que las especies anteriores. Dichas técnicas habrían brindado a los homininos de la Edad del Hielo la oportunidad de ocupar cada vez más hábitats. En las épocas de bonanza, habrían posibilitado que las poblaciones se expandiesen y ocupasen regiones marginales que, de otro modo, habrían quedado fuera de su alcance. Pero, cada vez que el clima se deterioraba, la cultura no habría bastado para hacerle frente. Como resultado, numerosas poblaciones se habrían diezmado y fragmentado.

Tales grupos pequeños y aislados habrían gozado de las condiciones ideales para afianzar las novedades genéticas y culturales, así como para una especiación posterior. Cuando las condiciones mejoraban de nuevo, esas poblaciones modificadas se habrían expandido y habrían entrado en contacto unas con otras. En caso de especiación, lo más probable es que esta condujese a la competencia y la eliminación selectiva. En caso contrario, las novedades genéticas se habrían incorporado a la mezcla de poblaciones. Sea como fuere, se produjo el cambio. En las condiciones inestables de la Edad del Hielo, ese proceso se habría repetido numerosas veces en poco tiempo, allanando el terreno para una evolución excepcionalmente rápida e impulsada, en última instancia, por la cultura material.

Cuando la tormenta pasó solo quedábamos nosotros: los afortunados beneficiarios de un cóctel de avances cognitivos, innovación tecnológica y cambios climáticos. Nuestra ventaja competitiva muy probablemente se debió a la adquisición de un modo único de pensamiento simbólico, gracias al cual podemos maquinar y planificar de una forma sin parangón en la historia natural. Curiosamente, ese desarrollo parece haber aparecido en *Homo sapiens* cuando este llevaba ya un tiempo sobre el planeta, sin duda incentivado por algún estímulo cultural. Parece muy probable que fuese la invención del lenguaje, máxima expresión de la actividad simbólica.

Esta nueva manera de ver la evolución, en la que nuestra especie —sin duda notable— vio la luz gracias a una rápida sucesión de acontecimientos aleatorios externos, resulta menos heroica que la imagen tradicional. Sin embargo, una mirada más detenida la convierte en una hipótesis totalmente plausible. No hacen falta grandes dosis de introspección para convencerse de que, con todas sus impresionantes cualidades, *Homo sapiens* es también tremendamente imperfecto: un aspecto sobre el que se han escrito ríos de tinta, buena parte de la mano de psicólogos evolucionistas.

Ver nuestra asombrosa especie como un accidente evolutivo encierra, sin embargo, una profunda lección. Si no hemos sido moldeados por la evolución con ningún fin concreto —adaptados a un ambiente y hechos a la medida de un propósito—, gozamos de una libertad de acción que otras especies no tienen. De hecho, podemos tomar decisiones sobre nuestro comportamiento. Lo cual significa, por supuesto, que debemos hacernos responsables de ellas.

PARA SABER MÁS

Once we were not alone. Ian Tattersall en *Scientific American* (edición especial), mayo de 2003.
How we came to be human. Ian Tattersall Tattersall en *Scientific American* (edición especial), junio de 2006.
Masters of the Planet: The search for our human origins. Ian Tattersall. Palgrave Macmillan, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Homínidos contemporáneos. Ian Tattersall en *IyC*, marzo de 2000.
Polifacético, flexible e ingenioso. Miriam Noël Haidle en *IyC*, febrero de 2012.
Los orígenes de la creatividad. Heather Pringle en *IyC*, mayo de 2013.

por Jorge Hernández-Urcera y Ángel Guerra



La reproducción del pulpo

El fin de una vida marca el inicio de otras miles

Como todos los cefalópodos, el pulpo común (*Octopus vulgaris*) es una especie dioica, es decir, sus individuos pertenecen a uno de ambos sexos. Aunque resulta difícil distinguir un macho de una hembra en su etapa juvenil, en la edad adulta muestran un claro dimorfismo sexual. En los machos, de menor talla, el tercer brazo derecho se transforma en su tramo final y funciona como un pene, el hectocotilo. Otros dos de sus brazos poseen uno o dos pares de ventosas agrandadas. Unos caracteres morfológicos externos de los que carecen las hembras adultas.

En la cópula, el macho introduce el brazo hectocotilizado en la cavidad paleal de la hembra y deposita en ella los espermatozoides. Los pulpos son promiscuos. Igual que en otras especies de cefalópodos, probablemente existe competencia espermática: el esperma de un macho puede ser retirado por el de otro que copule más tarde. Tras la fecundación, la hembra busca un lugar para realizar la puesta, una cueva o anfractuosidad de la roca de suficiente amplitud, oculta y fácil de defender.

La hembra coloca los huevos en ristras que une al techo de la cueva por un extremo, formando racimos. El desarrollo embrionario dura de uno a cuatro meses, dependiendo de la temperatura del agua. Durante este tiempo la hembra permanece acantonada en su guarida, aireando, limpiando y protegiendo la puesta; no se alimenta, sino que aprovecha sus sustancias de reserva para sobrevivir. Cuando el embrión alcanza el tamaño apropiado dentro del huevo y el saco vitelino se ha consumido casi por completo, se produce la eclosión. Entonces, la madre, agotada y desgastada, muere.

Un recién nacido de pulpo es morfológicamente semejante a un adulto. El desarrollo embrionario es directo, no hay metamorfosis con distintas etapas larvarias, como ocurre en los demás moluscos. A esta fase del ciclo biológico del pulpo se la denomina paralarva. Después de un período más o menos prolongado de vida planctónica en aguas profundas, las paralarvas se acercan a la costa y se asientan en el fondo. Los juveniles bentónicos poseen una gran capacidad para cazar presas vivas, así como un amplio repertorio de respuestas cromáticas y posturales que les ayudan a esconderse de sus depredadores.

Actualmente, los autores investigan en el Parque Nacional de las Islas Atlánticas de Galicia las condiciones topográficas, hidrográficas y biológicas de los hábitats de reproducción del pulpo. De esta forma, se podrá elaborar un plan que permita preservar las áreas de puesta y alevinaje de estos cefalópodos de tan alto interés comercial.

—Jorge Hernández Urcera y Ángel Guerra
Instituto de Investigaciones Marinas del CSIC, Vigo

JORGE HERNÁNDEZ URCERA



DETALLE DE UN RACIMO DE LA PUESTA. Los huevos miden unos tres milímetros de longitud. En ellos ya se distinguen los cromatóforos, las células con pigmentos que permiten al pulpo cambiar de color.

EL CICLO BIOLÓGICO del pulpo atraviesa varias fases. Durante la cópula, el macho (*a, arriba*) introduce en la hembra (*a, abajo*) uno de sus brazos transformado en pene, el hectocotilo. La hembra, tras depositar los huevos en una cavidad de roca, permanece todo el tiempo en su guarida para cuidar y proteger la puesta (*b*). Cuando nacen las paralarvas, de vida planctónica, miden unos tres milímetros de longitud y tienen solo tres ventosas en cada brazo (*c*). Más tarde, los alevines de pulpo se asientan en el fondo arenoso (*d*). Por entonces miden unos 18 milímetros y poseen entre 23 y 25 ventosas en cada brazo.

por Ambrosio Velasco Gómez

Ambrosio Velasco Gómez es investigador en el Instituto de Investigaciones Filosóficas de la Universidad Nacional Autónoma de México.



Ciencia y sentido común, ¿adversarios o aliados?

La investigación científica requiere tanto rigor metodológico como sentido común

La concepción moderna de la racionalidad tiene como principal característica la aspiración a un lenguaje preciso y universal, y el recurso a un método demostrativo que supuestamente garantiza la certeza del conocimiento. Esta idea, propuesta principalmente por Descartes, se consolidó como la versión predominante de la racionalidad a partir de la segunda mitad del siglo XVII y aún en nuestros días goza de una amplia aceptación. La mejor realización de la misma se encontraría precisamente en el conocimiento científico, empezando por las matemáticas y la física, y extendiéndose después hasta la ciencia política —según proponía Hobbes— y las ciencias sociales —según Comte, Spencer, Marx, Durkheim o Stuart Mill.

La asociación, e incluso identificación, de la ciencia con esta idea de racionalidad tuvo entre sus consecuencias el desprecio y abandono de otras concepciones, como la retórica y la dialéctica, que se habían desarrollado desde la Antigüedad hasta el Renacimiento. Estas se alimentan y fundan en el impreciso lenguaje específico de cada comunidad, que condensa una experiencia histórica particular, así como en formas de interpretar y juzgar propias de comunidades, que expresan solo consensos locales. En una palabra, la retórica, la dialéctica y las formas de interpretación y argumentación de la gente «común y corriente» se fundan en el *sensus communis* o sentido común de cada pueblo o nación.

La oposición entre sentido común y conocimiento científico se manifiesta ya con claridad en la obra de Cervantes. Tanto Sancho como Don Quijote argumentan con dichos y refranes, que son máximas populares del sentido común. Frente a ellos, el bachiller Sansón Carrasco representa la argumentación racional, estricta y demostrativa. El genio de Cervantes podía ver ya desde principios del siglo XVI la marcha ascendente de una nueva forma de racionalidad extraña y universal, como la que impuso Carrasco a Don Quijote, tras su derrota en las playas de Barcelona. Todos sabemos el desenlace: ante una vida así de racional, mejor morir. Y mientras Don Quijote muere en la novela de Cervantes, la racionalidad universal se consolida en la filosofía y las ciencias modernas en detrimento del humanismo renacentista que celebraba la pluralidad de saberes y formas de racionalidad, incluida la propia del *sensus communis*.

Pero como bien señala Stephen Toulmin, el ámbito de aplicación de la nueva racionalidad es tan estrecho que se restringe a las matemáticas y a la teoría física, dejando fuera todo lo demás. Ese reduccionismo del racionalismo moderno se evidencia al confrontarlo con las concepciones pluralistas del humanismo renacentista. Por ejemplo, en un libro de lógica, filosofía del lenguaje y teoría del conocimiento de muy amplia circulación en las universidades del mundo iberoamericano del siglo XVI, Alonso de la Veracruz, fundador de la Universidad de México, siguiendo a Aristóteles comenta: «Tres son los grados de certeza. El primero está en las matemáticas [...] El segundo está en los discursos dialécticos [...] El tercer y último grado de certeza está en la retórica». Alonso admite aquí diversos tipos de conocimiento razonable y considera que todos ellos parten de conocimientos previos, esto es, tienen carácter histórico y dependen (cada uno en distinta medida) del contexto.

Frente al racionalismo moderno, desarrollado sobre todo en Francia, Inglaterra y Alemania, en la cultura barroca del mundo iberoamericano e italiano persistió el humanismo renacentista plural. Baltasar Gracián y Giambattista Vico son ejemplos de grandes filósofos que defendieron una concepción amplia de la racionalidad basada en el sentido común, como alternativa y resistencia ante un racionalismo obsesionado por la certeza y el método. También en la literatura barroca del Siglo de Oro se desarrolló una profunda crítica al floreciente racionalismo moderno. Escritores como Cervantes y Calderón de la Barca, en España, o sor Juana Inés de la Cruz y Juan Ruiz de Alarcón en México cuestionaron las desmedidas pretensiones de los modernos racionalistas.

Vico es, sin duda, el crítico más influyente de la concepción moderna de la racionalidad del siglo XVIII. Cuestiona sus fundamentos lingüísticos, metodológicos y episte-



GIAMBATTISTA VICO (1668-1744). Retrato de Francesco Solimena.

mológicos. En su lugar, rescata las formas de argumentación clásicas de la retórica, retoma un criterio pragmático de verdad y pondera el sentido común como fuente de sabiduría. La racionalidad cartesiana, según Vico, al exigir certeza para todo conocimiento, rechaza lo verosímil como falso, con lo cual desprecia el sentido común. Y, al generalizar el método de la geometría a la física y a otras ciencias, pretende realizar demostraciones donde solo cabe el conocimiento verosímil. «Los doctos imprudentes —concluye—, al no haber cultivado el sentido común, ni haber seguido nunca lo verosímil, no toman en consideración lo que opinan comúnmente los hombres.»

La aguda crítica de Vico y su propuesta alternativa basada en el sentido común y la prudencia no hizo mella en la filosofía de las ciencias naturales. Solo en el campo de la filosofía de la cultura y de la historia influyó sobre los románticos alemanes del siglo XIX, como Herder, Humboldt, Droysen y, posteriormente, Dilthey. Estos desarrollaron una concepción hermenéutica para las ciencias socioculturales, en contra del materialismo histórico y el positivismo predominantes. Esta orientación hermenéutica de las ciencias sociales será desarrollada en el siglo XX por autores como Weber, Cassirer, Schütz, Winch, Wittgenstein y Gadamer, entre otros.

A pesar de la importancia de la perspectiva hermenéutica, la concepción cartesiana de la racionalidad ha mantenido su hegemonía durante el siglo XX, no solo en el ámbito de las ciencias naturales, sino también en las sociales, en filosofía y en la vida social y política. Pero esta hegemonía no ha estado libre de objeciones. Y lo que es más significativo: la concepción moderna de la racionalidad ha sido cuestionada precisamente en el terreno de las ciencias naturales. Desde principios de siglo XX, en el seno mismo de la filosofía de la ciencia, Pierre Duhem realizó una demoledora crítica a varios de los supuestos de la metodología moderna mantenidos desde Descartes. Con base en su investigación sobre historia de la astronomía y en su experiencia como científico, Duhem muestra con argumentos sólidos que no hay método ni lógica que por sí mismos sean suficientes para refutar o verificar teoría alguna. La ciencia se mueve entre lo verdadero y lo falso, como decía Vico, en lo verosímil. Pero ello no implica que no se puedan valorar y seleccionar racionalmente teorías en competencia. Lo que sucede es que la racionalidad no se agota en la lógica y la metodología. Hay razones que ellas no entienden y que proceden de la prudencia, del buen sentido (*bon sens*). Con ello, Duhem realiza una verdadera revolución filosófica en el corazón mismo de las ciencias naturales, al sostener con los mejores argumentos que en física, y en toda ciencia, se requiere, además de métodos rigurosos, buen sentido y juicio prudencial.

Retomando las ideas de Duhem, Otto Neurath, uno de los fundadores del positivismo lógico, criticó con agudeza los presupuestos de la concepción cartesiana del conocimiento. Cuestionó la idea de que, a diferencia de lo que sucede en los asuntos prácticos, en las ciencias es posible asegurar la verdad de las teorías a través de un método riguroso. Esta excesiva confianza metodológica, que raya en la «metodolatría», es considerada por Neurath síntoma inequívoco de pseudorracionalismo. El verdadero racionalismo es consciente de sus límites, sobre todo las insuficiencias de la lógica y de la metodología, y reconoce que estas deben ser complementadas con razones prácticas que él denomina «motivos auxiliares».

Desafortunadamente, el espíritu crítico y renovador de Duhem y de Neurath no caló de modo inmediato en los principales filósofos de la ciencia. Autores como Popper o Hempel volvieron al ideal de una racionalidad cartesiana y centraron su interés en elucidar un criterio metodológico para definir la ciencia.

Ese panorama comienza a mutar cuando Thomas Kuhn, en su interpretación del cambio científico, rechaza las rígidas normas metodológicas de Popper por considerar que no se aplican normalmente en la práctica científica. En su lugar, retoma una idea de Michael Polanyi acerca de la tensión esencial entre la fuerza conservadora de la tradición, que cohesiona la comunidad científica, y la fuerza crítica e innovadora. Por medio de la solución prudencial de esta tensión la ciencia progresa. Normalmente, aunque no siempre, la fuerza de la tradición se impone gracias al peso de convenciones conceptuales, metodológicas y teóricas, que constituyen el paradigma que da identidad a las comunidades científicas. El paradigma reúne así las características y funciones del sentido común, pues, además de facilitar la base hermenéutica para la interpretación de los fenómenos, proporciona también las metodologías y criterios de evaluación de hipótesis. Estos criterios no se aplican de manera algorítmica, sino a través de controversias en el seno mismo de la comunidad científica, entre los científicos innovadores y los tradicionalistas. La resolución de estas controversias no es de carácter demostrativo, sino más bien prudencial. Entre esta visión del cambio científico y el *bon sens* de Duhem hay cierto aire de familia.

De hecho, el filósofo popperiano Imre Lakatos intentó conciliar el enfoque metodológico de Popper con el historiográfico de Kuhn recurriendo a las ideas de Duhem. Se proponía superar el falsacionismo popperiano en aras de uno más sofisticado. Sin embargo, terminó rechazando el buen sentido por ambiguo, y lo sustituyó por reglas metodológicas. No obstante la tenacidad con la que Popper y Lakatos persistieron en una racionalidad metodológica, se vieron obligados a reconocer ciertos elementos de racionalidad prudencial y de sentido común.

En suma, la filosofía de la ciencia de los años sesenta y setenta del siglo pasado se vio en la necesidad de retomar las propuestas de una racionalidad prudencial, basada en el diálogo plural y en el sentido común, para superar las deficiencias de una racionalidad meramente metodológica. Con ello llegó a su fin la oposición radical entre racionalidad teórica y práctica; entre ciencia y prudencia; entre reglas metodológicas y sentido común; y, en última instancia, entre ciencias y humanidades. La racionalidad científica requiere tanto metodologías rigurosas como sentido común. Esta convergencia de racionalidades encuentra hoy una amplia aceptación en la filosofía de la ciencia, principalmente iberoamericana. Pero no es exclusiva de este ámbito: destacados filósofos anglosajones como Philip Kitcher, Stephen Turner, Carl Mitcham, Steve W. Fuller o Gillian Rose, también han impulsado esta nueva perspectiva.

PARA SABER MÁS

Otto Neurath: Philosophical papers 1913-1946. Otto Neurath. Reidel, 1962.
La tensión esencial. Thomas Kuhn. FCE, 1982.
Cosmopolis. The hidden agenda of modernity. Stephen Toulmin. The University of Chicago Press, 1990.
La teoría física, su objeto y su estructura. Pierre Duhem, Herder, 2003.
Aproximaciones a la filosofía política de la ciencia. Coordinado por Carlos López Beltrán y Ambrosio Velasco. Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.

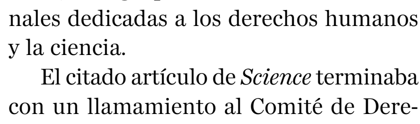
EN NUESTRO ARCHIVO

Libertad y belleza en *La théorie physique*. Alfredo Marcos en *IyC*, septiembre de 2013.

por Mikel Mancisidor



Mikel Mancisidor, miembro del Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de la ONU, es relator del Comité para la Observación General sobre el Derecho a la Ciencia.



El derecho a la ciencia

Tan necesario como desconocido

Situémonos en el tiempo: en 1945, a la salida de la Segunda Guerra Mundial, la ciencia no vivía su momento de mayor popularidad. Las bombas atómicas y los experimentos «médicos» nazis crearon cierto clima de prevención hacia la ciencia. Afortunadamente, esta desconfianza no derivó en un rechazo, sino en un importante debate diplomático y jurídico sobre el papel de la ciencia y la responsabilidad de los científicos.

La UNESCO, por ejemplo, estaba prevista inicialmente como UNECO (Organización para la Educación y la Cultura, sin la S de *Science*), pero la insistencia de algunos científicos, liderados por Julian Huxley, logró en 1945 la inclusión de la ciencia en el nombre y en el mandato de la organización. Se consideraba importante que los científicos estuvieran íntimamente relacionados con las humanidades y que sintieran que tenían una responsabilidad para con la sociedad.

Durante la redacción de la Declaración Universal de los Derechos Humanos, el debate enfrentó a quienes defendían que la ciencia debía servir a los fines de la humanidad y quienes consideraban peligroso, en plena guerra fría, permitir que los Estados decidieran qué investigaciones eran adecuadas o no a determinados fines políticos, por muy nobles que estos pudieran parecer. En 1948, el texto acabaría diciendo en su artículo 27: «Toda persona tiene derecho [...] a participar en el progreso científico y en los beneficios que de él resulten».

El derecho a la ciencia volvió a aparecer en los tratados que desarrollaron la Declaración. El artículo 15 del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales reza «los Estados partes reconocen el derecho a [...] gozar de los beneficios del progreso científico y de sus aplicaciones».

Con todo, el derecho a la ciencia es todavía muy desconocido, incluso entre activistas y expertos en derechos humanos. También suelen olvidarlo los organismos internacionales y los Estados, si bien están obligados por el citado tratado a protegerlo y fomentarlo.

Existen pocos artículos o monografías dedicados al derecho a la ciencia. Y en la práctica judicial son escasísimas las sentencias de altos tribunales que hayan fundamentado sus decisiones, siquiera de manera secundaria o complementaria, en este derecho.

Pero las cosas están cambiando. La comunidad internacional está dando pasos para sacar este derecho de su ostracismo y ponerlo al día. En esta tarea participan agentes del mundo de la ciencia y del mundo del derecho internacional.

En su número del 14 de junio de 2013, la revista *Science* dedicó a esta cuestión un artículo titulado «A human right to science», en que animaba a la comunidad científica internacional a participar en el desarrollo del derecho humano a la ciencia.

En ese proceso están participando ya importantes agentes científicos. La Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia, la sociedad científica más grande del mundo, tiene un programa específico sobre el derecho humano a la ciencia. Algunas academias científicas han nombrado delegados o encargados para esta cuestión. Además, la Red Internacional de Academias y Sociedades Académicas incluye un grupo de 80 academias nacionales dedicadas a los derechos humanos y la ciencia.

El citado artículo de *Science* terminaba con un llamamiento al Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (CDESC) de la ONU para que iniciase la definición del contenido normativo de este derecho.

Este año 2014, el CDESC por fin ha respondido a la demanda y ha decidido definir una posición oficial bajo el nombre de Observación General. Esta constituye una interpretación auténtica de las obligaciones del tratado y, por tanto, un llamado directo a los 162 estados partes, incluidos España y la inmensa mayoría de los de habla hispana.

¿Podemos avanzar ya cuál será ese contenido normativo, cuya aprobación se prevé en unos 3 o 4 años? ¿A qué obligará a los Estados parte? ¿De qué manera protegerá al científico y al ciudadano? A mi juicio, este derecho debería incluir, además del genérico derecho a gozar de los avances de la ciencia, otros aspectos como: el acceso a la tecnología; la protección de la libertad y la seguridad de investigación; la participación democrática en las políticas públicas de fomento de la ciencia y la tecnología; la participación en el control de riesgos; la participación en la empresa científica (incluida la ciencia ciudadana); el acceso al conocimiento (mediante la educación formal, divulgación de calidad, políticas de acceso abierto); la participación de la mujer en las tareas científicas y técnicas, y la cooperación científica internacional, entre otros.

Para ello necesitaremos una alianza de las Naciones Unidas, las universidades, las organizaciones de derechos humanos y el mundo científico y sus asociaciones. A esta alianza es a la que este artículo quiere llamar: para el bien de la ciencia, el de los científicos y el de la sociedad internacional de la que son parte.



THINKSTOCK/SOLARSEVEN

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO*
o 5 ejemplares de *TEMAS*
por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. MEDIOAMBIENTE
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. ENERGÍA
Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 12,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica

(*) Disponible solo en formato digital

MENTE y CEREBRO Cuadernos

Precio por ejemplar: 6,90€

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner

(*) Disponible solo en formato digital

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€



BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

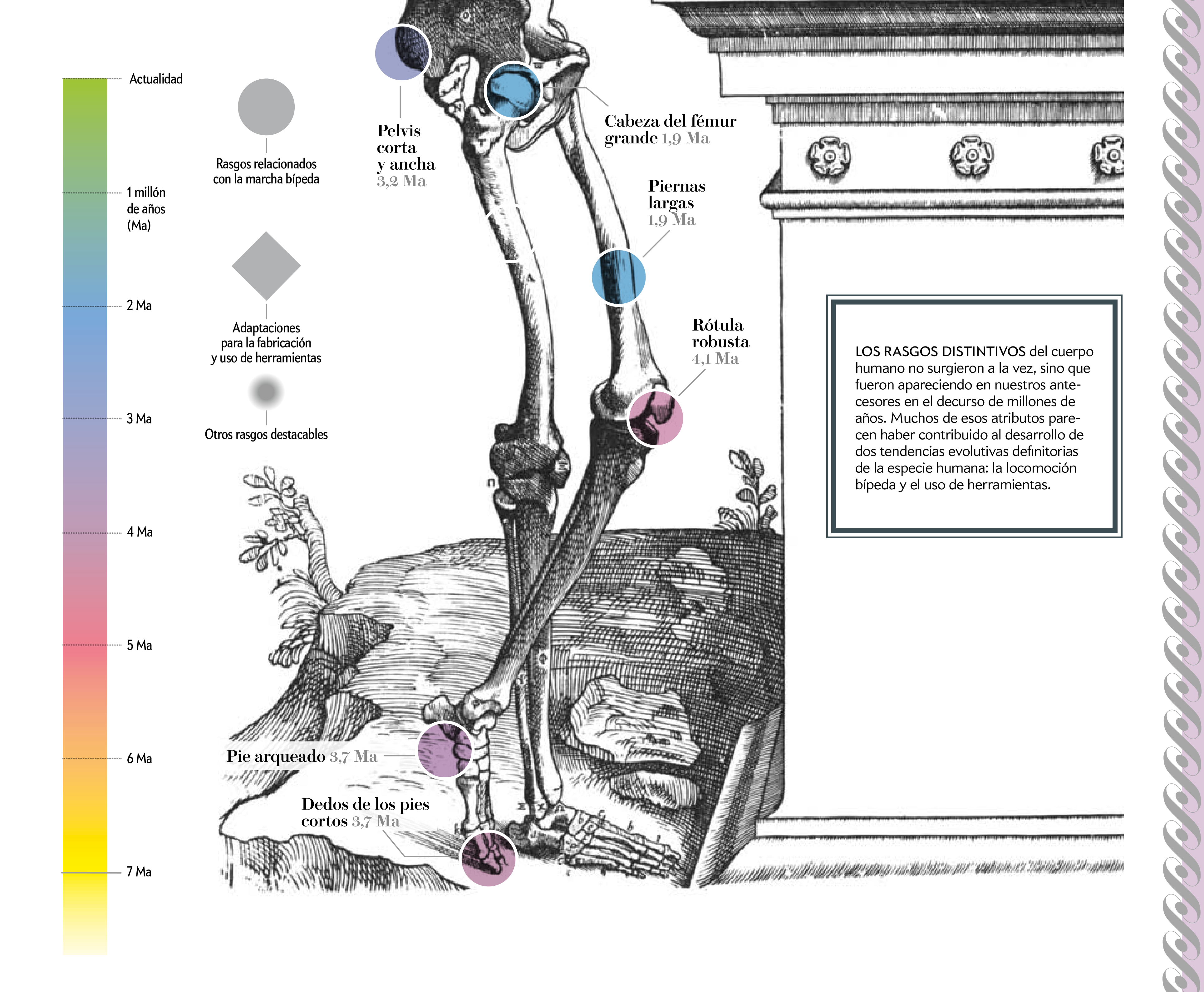
Para efectuar su pedido:
Teléfono: (34) 934 143 344
A través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

QUÉ NOS HACE ESPECIALES



CORBIS



LOS RASGOS DISTINTIVOS del cuerpo humano no surgieron a la vez, sino que fueron apareciendo en nuestros antecesores en el decurso de millones de años. Muchos de esos atributos parecen haber contribuido al desarrollo de dos tendencias evolutivas definitorias de la especie humana: la locomoción bípeda y el uso de herramientas.


Vínculos
Pareja
Familia

VENTAJAS EVOLUTIVAS DE LA MONOGAMIA

Emparejarse tal vez fue la mejor decisión que pudieron tomar nuestros ancestros

Blake Edgar

EN SÍNTESIS

La monogamia es nuestro sistema de emparejamiento predominante, incluso en las sociedades que toleran la poligamia. Somos singulares en el mundo animal: menos del 10 por ciento de los mamíferos mantienen parejas sexuales exclusivas.

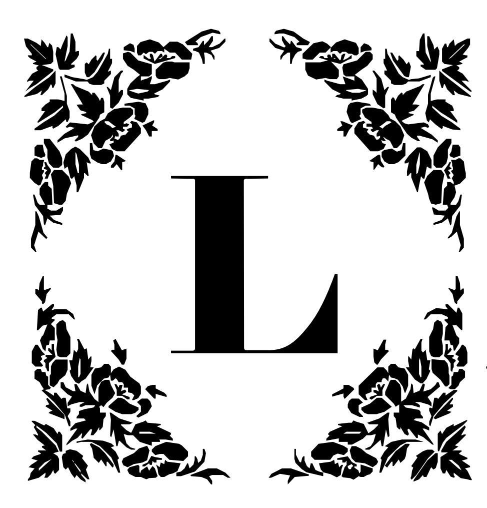
El debate sobre cómo llegamos a este punto dura décadas y sigue sin respuesta, pero nuevos estudios están aclarando la cuestión.

Ahora sabemos que los primeros homininos, aparecidos hace siete millones de años, pudieron ser monógamos. Los humanos hemos mantenido esta estrategia por una buena razón: nos ha ayudado a convertirnos en la especie de cerebro voluminoso que ha conquistado el planeta.

MARTIN O'NEILL



Blake Edgar es coautor del libro *From Lucy to language*, entre otros títulos, y redactor colaborador de *Archaeology Magazine*. Es, además, editor de adquisiciones de la editorial University of California Press.



Los mamíferos no destacan por ser monógamos. Las especies cuyos adultos forman parejas reproductoras únicas no alcanzan el 10 por ciento. El orden de los primates apenas mejora esa tónica. Si bien entre el 15 y el 29 por ciento de las especies prefiere la convivencia en pareja, son contadas las que se decantan por la monogamia en el sentido humano: el vínculo sexual exclusivo entre dos individuos.

La especie humana no puede presumir de un historial intachable. Las personan tienen aventuras, se divorcian y, en algunas culturas, contraen matrimonio con varias parejas a la vez. De hecho, la poligamia se presenta en numerosas sociedades del planeta. Pero incluso allí donde se permite, representa una opción minoritaria. La mayoría de las sociedades humanas se organizan sobre la premisa de que gran parte de sus integrantes establecen lazos duraderos y exclusivos con su pareja. Y la monogamia parece haber hecho mucho bien a nuestra especie. Las uniones de pareja constituyen una adaptación fundamental que surgió en un remoto antepasado y se convirtió en un elemento central de los sistemas sociales humanos y de nuestro éxito evolutivo. «Este tipo de vínculo nos confiere una gran ventaja respecto a otras especies», asegura Bernard Chapais, antropólogo de la Universidad de Montreal.

La pareja monógama también es la base de una característica netamente humana: las vastas y complejas redes sociales en las que vivimos. Mientras que en otros primates los individuos jóvenes solo crean vínculos de parentesco a través de la madre, los humanos los entablamos a partir de ambos progenitores, ensanchando los lazos familiares con cada generación. En nuestra especie, la red social abarca otras familias y grupos sin parentesco, lo que origina círculos de relaciones cada vez más amplios. En opinión de Chapais, esos lazos grupales constituyen, junto con la monogamia, dos de los caracteres más trascendentales de la sociedad humana.

Los científicos llevan décadas intentando desentrañar los orígenes y las implicaciones de la monogamia humana, pero hasta ahora restan sin resolver preguntas básicas. Entre ellas, en qué momento del pasado comenzamos a emparejarnos de por vida, qué ventajas nos reportó y cómo pudo incentivar nuestro éxito como especie. Sin embargo, algunas investigaciones recientes nos aproximan a la resolución de estas incógnitas.

ORÍGENES DE LA PAREJA

Es posible que nuestros ancestros más remotos fueran monógamos. En opinión del antropólogo C. Owen Lovejoy, de la Universidad estatal de Kent, el registro fósil indica que la monogamia es anterior incluso a *Ardipithecus ramidus*, especie conocida por un esqueleto parcial femenino de 4,4 millones de años, apodado Ardi, descubierto en la región etíope del Medio Awash. Según Lovejoy, poco después de la bifurcación que dio lugar a los linajes de los grandes simios y los humanos hace más de siete millones de años, nuestros antecesores adoptaron una tríada trascendental de comportamientos: el acarreo de alimentos en los brazos tras quedar estos liberados por la locomoción bípeda, la formación de parejas estables y la ocultación de las señales externas de la ovulación. La aparición de estas innovaciones otorgó a los homininos (la tribu surgida cuando los primeros humanos se separaron de los chimpancés) una ventaja reproductiva respecto a los grandes simios.

De acuerdo con esta hipótesis, el ancestral sistema de apareamiento poligámico fue reemplazado por las uniones en pareja cuando los machos subordinados dejaron de invertir sus fuerzas en luchar entre sí y comenzaron a buscar alimentos con los que agasajar a las hembras. Estas preferían escoger a los proveedores fiables antes que a los competidores agresivos, y se apareaban con los mejores recolectores. Con el tiempo, acabaron perdiendo la hinchazón y el enrojecimiento de los genitales y cualquier otro signo de receptividad sexual que pudiera atraer a machos rivales mientras su compañero andaba buscando alimento.

Lovejoy señala como prueba la dentadura de *A. ramidus*. En esta especie, las diferencias con respecto al tamaño de los caninos entre ambos sexos resultan mucho menos aparentes que en los simios superiores actuales y fósiles. La evolución convirtió los aguzados caninos masculinos de numerosos primates en armas formidables que blandir en los combates por una pareja.



UN MACHO ADULTO DE GORILA DE MONTAÑA (*derecha*) **dirige su clan en Ruanda. Los gorilas, que son polígamos, viven en pequeños grupos formados por un macho dominante, varias hembras adultas y sus descendientes.**

PETER G. VEIT, *NATIONAL GEOGRAPHIC*

No sucede así en los primeros homininos. Fijémonos en los dientes del gorila macho. En comparación, los humanos de ambos sexos poseemos caninos pequeños y romos. Se trata de un rasgo poco amenazador propio de los homininos y también de las primeras especies de *Ardipithecus*.

De modo similar, existe una vaga correlación entre el comportamiento reproductor de los primates y el dimorfismo sexual, esto es, las diferencias de tamaño y peso entre los machos y las hembras de la especie. Cuanto más acusado es el dimorfismo, más probable es que los machos combatan por las hembras. En un extremo se sitúa el gorila macho, polígamo, que duplica con creces la talla de la hembra. En el extremo opuesto se encuentra el gibón, básicamente monógamo, en el que machos y hembras pesan casi lo mismo. Los humanos nos hallamos más cerca de este último en el espectro del dimorfismo: el varón llega a pesar un 20 por ciento más que la mujer.

El registro fósil, empero, no permite deducir mucho más. El paleoantropólogo J. Michael Plavcan, de la Universidad de Arkansas, invita a la prudencia cuando se intenta adivinar la conducta social de los homininos a partir de los huesos fosilizados. Pongamos el ejemplo de *Australopithecus afarensis*, la especie a la que pertenece Lucy y que vivió hace entre 3 y 3,9 millones de años. A semejanza de *Ardipithecus*, sus caninos eran pequeños, pero el esqueleto exhibe el mismo grado de dimorfismo que los chimpancés y los gorilas actuales. «Por una parte, el dimorfismo corporal indica que los machos de *A. afarensis* competían por las hembras y, por la otra, las escasas diferencias en los caninos señala lo contrario. Es un enigma», opina Plavcan.

Numerosos antropólogos ponen en duda la conclusión de Lovejoy de que la monogamia fomentada por machos proveedores de alimento representó una estrategia de los homininos durante millones de años. El año pasado, Chapais arguyó en la revista *Evolutionary Anthropology* que las singulares características familiares y sociales de los humanos (monogamia, lazos de parentesco a través de ambos progenitores y círculos sociales crecientes) surgieron de forma escalonada. Según él, antes del primer paso los homininos de ambos sexos eran promiscuos como los chimpancés. Después se produjo la transición a la poligamia, que pervive en el gorila. Pero contar con varias compañeras resulta agotador porque implica andar a la greña con otros machos y guardar celosamente el harén. La monogamia pudo surgir como la mejor alternativa para reducir el esfuerzo que supone la poligamia.

Chapais no especula sobre el momento en que tuvo lugar ese cambio ni las especies a las que afectó. Pero otros investigadores dirigen su mirada al período que va desde hace entre 1,5 y 2 millones de años, tras la aparición del género *Homo*

y cuando se produjeron los cambios físicos que se observan en *Homo erectus*, seguramente el primer hominino que logró migrar fuera de África. Esta especie era mucho más corpulenta que las predecesoras, con proporciones que recuerdan a las del hombre actual. Con una talla que duplica la de Lucy y sus conespecíficos, también parece mostrar un dimorfismo sexual menos acusado que los australopitecinos y los primeros miembros del género *Homo*. El exiguo registro fósil indica que las hembras de *H. erectus* comenzaron a tener una estatura similar a la de los machos y un grado de dimorfismo semejante al de los humanos modernos, lo cual indica que la especie no era tan competitiva como las antecesoras. Dado que los primates de corpulencia similar tienden a ser monógamos, ese cambio podría indicar una tendencia hacia una conducta de apareamiento más exclusiva.

UNA RELACIÓN ESTRATÉGICA

Si no existe acuerdo acerca del momento en que los humanos nos convertimos en monógamos, difícilmente podrá haberlo sobre la causa que lo motivó. En 2013 dos equipos de investigación publicaron sendos estudios estadísticos, realizados a partir de datos bibliográficos, para averiguar el tipo de comportamientos que podrían haber propiciado la monogamia. Ambos pretendían concretar la razón que la originó partiendo de tres hipótesis bien fundadas, a saber: la dispersión de las hembras, la abolición del infanticidio y el cuidado paterno.

La hipótesis de la dispersión femenina propone que la monogamia surgió cuando las hembras comenzaron a delimitar territorios más extensos con el fin de ampliar el acceso a recursos alimentarios y, en el proceso, se distanciaron unas de otras. Ese alejamiento hizo que la búsqueda y el mantenimiento de varias parejas a la vez resultase harto difícil para los machos. «Sentar la cabeza» con una sola compañera simplificó las cosas: disminuía el riesgo de ser heridos mientras patrullaban el territorio y les aseguraba ser el padre de los retoños de su pareja.

Los zoólogos Dieter Lukas y Tim Clutton-Brock, de la Universidad de Cambridge, han hallado indicios que avalan esta idea, según han expuesto en *Science*. El análisis estadístico de 2545 especies de mamíferos demostró que todas comenzaron siendo animales solitarios que no establecían vínculos sexuales; después, algunas especies adoptaron la monogamia hasta en 61 ocasiones en el curso de su historia evolutiva. Tal estrategia surgió sobre todo en los carnívoros y los primates, lo cual hace pensar que las especies tienden a formar parejas estables cuando las hembras requieren una alimentación nutritiva pero escasa (como carroña rica en proteínas o frutos maduros), que solo es posible conseguir campeando por un área extensa. Los resultados ofrecen la prueba más sólida de que la progresiva dispersión de las hembras llevó a los machos a buscar una sola pareja.

Lukas reconoce que la hipótesis podría ser válida para los primates no humanos pero no para los humanos: resulta difícil reconciliar la sociabilidad humana con una hipótesis basada en una baja densidad de hembras. Tal vez nuestros ancestros eran demasiado sociables para que las hembras vagaran desperdigadas por la sabana, a semejanza de otros mamíferos. Pero la teoría podría aplicarse a nuestros antepasados si la monogamia hubiera surgido en los homininos antes de la tendencia a vivir en grupo.

La segunda hipótesis principal sostiene que la monogamia apareció por la amenaza de la violencia mortal hacia la descendencia. Si un rival retaba o vencía a uno de los machos dominantes del grupo, el usurpador podía matar a las crías que no eran suyas. Las madres dejarían así de amamantar y comenzarían a ovular de nuevo, dando al intruso la posibilidad de propagar sus genes. Para evitar el infanticidio, la hembra escogería un macho que pudiera defenderla tanto a ella como a sus crías.



LOS MIRIQUINÁS DE SUDAMÉRICA son monógamos estrictos; el macho es el principal encargado del cuidado de las crías.

CORTESÍA DE MILAN KOŘÍNEK, www.biolib.cz/en

El antropólogo Kit Opie, del Colegio Universitario de Londres, respalda la hipótesis de la abolición del infanticidio en un estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. Él y sus colaboradores realizaron simulaciones informáticas de la historia evolutiva de 230 especies de primates; a continuación, aplicaron un análisis estadístico bayesiano para averiguar cuál de las tres hipótesis acerca del origen de la monogamia resultaba más probable. Hallaron una correlación entre la monogamia de los primates y cada una de las tres posibles causas, pero solo la amenaza del infanticidio precedió siempre a la monogamia en numerosos linajes de primates.

La biología y el comportamiento de los primates actuales añaden cierta verosimilitud a la conclusión de que el infanticidio propició la monogamia. Los primates son animales singulares en lo que concierne al riesgo de infanticidio: el gran cerebro precisa un tiempo para crecer y los retoños son dependientes y vulnerables hasta mucho después de nacer. La muerte violenta de crías ha sido observada en más de medio centenar de especies de primates; el agresor suele ser un macho ajeno al grupo que ataca al lactante con el propósito de dominar o ganar el acceso a las hembras. Pero existe una contradicción en esa idea: casi todas esas especies presentan sistemas de apareamiento promiscuos o polígamos, por lo que la distribución del infanticidio en los primates actuales no concuerda con la suposición de que la monogamia habría evolucionado ante la inquietante amenaza del infanticidio.

La tercera hipótesis que pretende explicar la aparición de la monogamia subraya la influencia del macho a través de los cuidados dispensados a las crías. Cuando la crianza se convierte en una tarea abrumadora para la madre en términos de calorías y esfuerzo, el padre que permanece con la familia y aporta alimentos o dispensa otras formas de atención aumenta las posibilidades de supervivencia de la descendencia y refuerza los lazos con la madre. Una idea afín, propuesta por el antropólogo Lee Gettler, de la Universidad de Notre Dame, sostiene que el

mero hecho de que el padre lleve a cuestas las crías de un lado a otro favorece la monogamia. Las madres tienen que alimentar a los lactantes, siempre hambrientos. Pero para los primates y las tribus de cazadores-recolectores, el acarreo de los bebés sin la ayuda de una soga u otra sujeción exige un dispendio de energía comparable al de la lactancia. El transporte de las crías por parte de los padres permitió a las hembras dedicar tiempo a la búsqueda de su propio sustento.

El miriquiná de Sudamérica brinda una idea del modo en que el cuidado paterno reforzaría la monogamia. Este pequeño mono vive en pequeños grupos familiares formados por una pareja adulta y un lactante, acompañados por uno o dos juveniles. La madre lleva a la cría aferrada al muslo justo después de nacer, pero, a partir de la segunda semana de vida, el padre asume el grueso del acarreo y los cuidados (limpieza, juego y alimentación). La pareja de adultos permanece en contacto directo a través de las colas, y la mera cercanía del macho a la hembra y su retoño podría fomentar profundos lazos afectivos.

Tener varias compañeras es agotador porque implica andar a la greña con otros machos y guardar celosamente el harén. La monogamia pudo surgir como la mejor alternativa para reducir ese esfuerzo

Asimismo, un estudio publicado en *Proceedings of the Royal Society B* el pasado marzo demuestra la existencia de monogamia en los miriquinás; se trata de la primera confirmación genética en un primate no humano. El ADN obtenido de varios grupos reveló que todas las hembras y todos los machos, menos uno, integrantes de 17 parejas eran los progenitores de 35 descendientes. «Llegan hasta el final y se comprometen en una relación monógama en términos genéticos», afirma uno de los autores del estudio, Eduardo Fernández-Duque, investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina y profesor en la Universidad Yale. Los lazos maritales de los miriquinás duran en promedio nueve años, y los monos que permanecen con la misma pareja tienen mayor éxito reproductivo, el objetivo último de todo sistema de apareamiento.

¿Qué tienen que decir los dos estudios estadísticos recientes acerca de la hipótesis del cuidado paterno? Ambos concluyen que, entre las tres hipótesis, esta predeciría peor el origen de la monogamia. No obstante, Lukas sostiene que el cuidado paterno podría explicar por qué una especie *sigue siendo* monógama.

SE NECESITA UNA COMUNIDAD

La monogamia de los progenitores no basta para criar un simio tan inteligente y social como el hombre, asegura la antropóloga Sarah Hrdy, de la Universidad de California en Davis. El bebé humano consume unos 13 millones de calorías en el largo período que separa el nacimiento de la madurez, una pesada carga para la madre, aun con la ayuda de la pareja.

Esa alta demanda tal vez explique por qué en tantas sociedades humanas las madres delegan una parte de los cuidados y de la alimentación de los hijos en «aloprogenitores» (como los parientes maternos o paternos u otros miembros del grupo). «Las madres humanas dejan que otros cuiden de sus bebés desde el mismo momento del nacimiento. Esto es algo asombroso y nada propio de los simios superiores», aclara Hrdy. En ningún simio superior se observa un papel siquiera similar al de los aloprogenitores.

Hrdy sostiene que la crianza cooperativa, un sistema social en el que los aloprogenitores participan en el cuidado de los retoños, apareció por primera vez hace casi dos millones de años en *H. erectus*. Este poseía un cuerpo y un cerebro mucho mayores que sus antecesores; un cálculo cifra que precisaba un 40 por ciento más de energía metabólica para mantener el cuerpo que los homininos anteriores. Si *H. erectus* inició la senda humana del lento crecimiento y la larga dependencia, los aloprogenitores tal vez se volvieron imprescindibles para satisfacer la demanda energética que suponía criar bebés con un cerebro voluminoso [*véase* «La receta humana de la crianza», por Ana Mateos, *en este mismo número*].

Karin Isler y Carel Van Schaik, de la Universidad de Zúrich, concluyen que sin la crianza cooperativa los primeros *Homo* no habrían podido superar el llamado «techo gris», que sitúa el volumen máximo del cerebro del simio superior en 700 centímetros cúbicos. Para compensar el coste energético que conlleva un cerebro de gran tamaño es necesario reducir la tasa de natalidad, el ritmo de crecimiento o ambos. Pero los humanos han logrado una lactancia más breve y un éxito reproductivo mayor que el que cabría esperar de animales cuyo volumen cerebral oscila entre 1100 y 1700 centímetros cúbicos. Isler y van Schaik atribuyen el éxito a la alopaternidad, que permitió a *H. erectus* concebir con mayor frecuencia sin mermar el aporte energético necesario para el desarrollo de semejante cerebro.

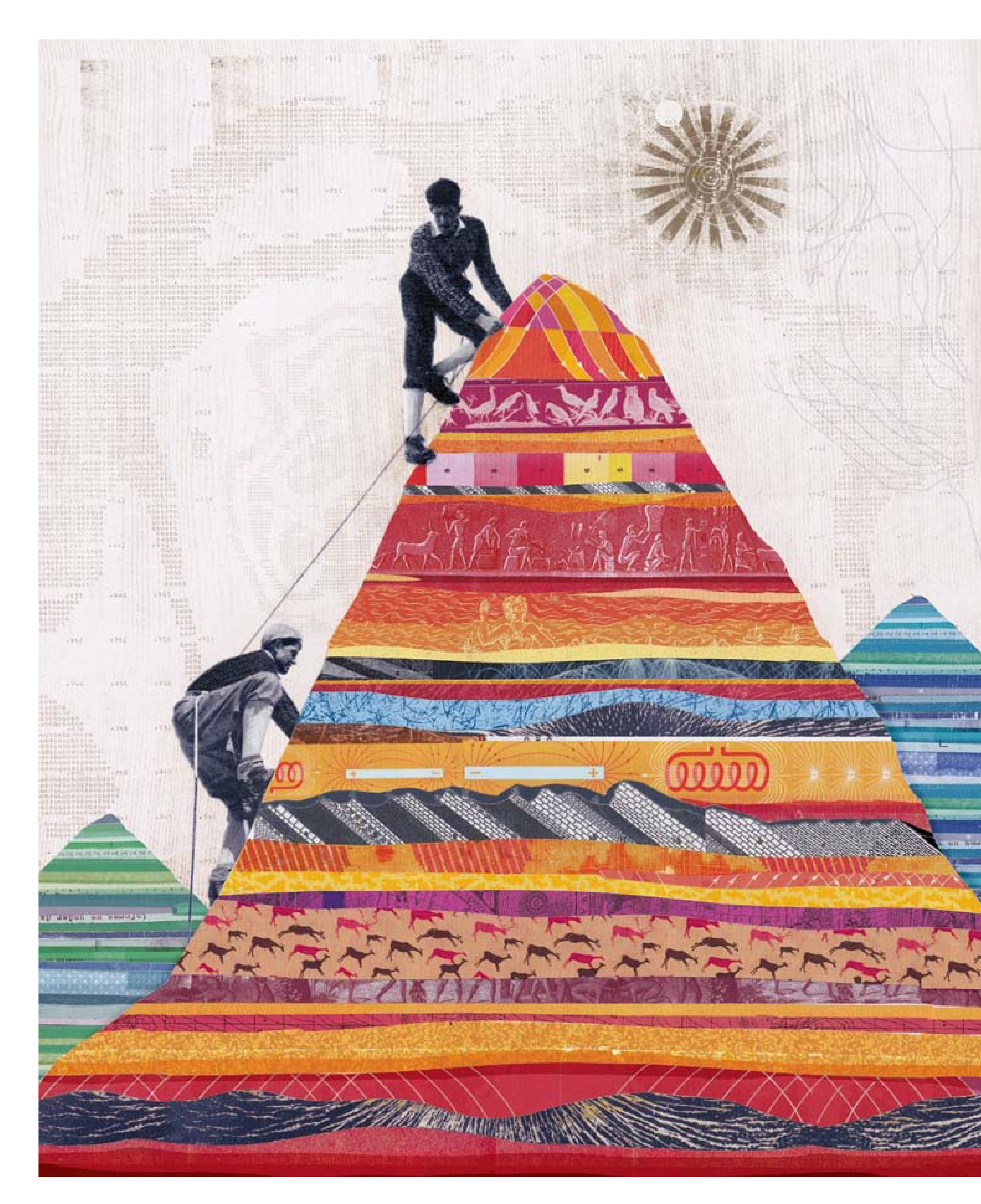
Fue la cooperación, pues, en forma de parejas monógamas, familias nucleares o tribus, la que permitió a los humanos triunfar cuando todos nuestros antepasados y parientes fósiles se extinguieron. La cooperación tal vez representa la principal habilidad que hayamos adquirido en los últimos dos millones de años, una aptitud que permitió a nuestro género sobrevivir a períodos de estrés y cambios ambientales, y que bien podría decidir el futuro de nuestra joven especie.

PARA SABER MÁS

Reexamining human origins in light of *Ardipithecus ramidus*. C. Owen Lovejoy en *Science*, vol. 326, págs. 74, 74e1-74e8, octubre de 2009.
Monogamy, strongly bonded groups, and the evolution of human social structure. Bernard Chapais en *Evolutionary Anthropology*, vol. 22, n.º 2, págs. 52-65, marzo/abril de 2013.
The evolution of social monogamy in mammals. D. Lukas y T. H. Clutton-Brock en *Science*, vol. 341, págs. 526-530, agosto de 2013.
Male infanticide leads to social monogamy in primates. Christopher Opie et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 110, n.º 33, págs. 13.328-13.332, agosto de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Evolución de la marcha humana. C. Owen Lovejoy en *IyC*, enero de 1989.
¿Por qué cooperamos? Martin A. Nowak en *IyC*, octubre de 2012.



RAÍCES DEL ESPÍRITU COOPERATIVO

La predisposición singular de nuestra especie a cooperar en sociedades de gran tamaño tiene un origen evolutivo remoto

Frans de Waal



EL DEBATE SOBRE EL MODO EN QUE LA HUMANIDAD HA LOGRADO ERIGIRSE EN la forma de vida dominante, con una población creciente que ya supera los siete mil millones de personas, ha girado siempre en torno a la competencia. Según se dice, nuestros ancestros fueron ocupando tierras y exterminaron otras especies, entre ellas a nuestros hermanos los neandertales, y cazaron los grandes depredadores hasta la extinción. Hemos conquistado la naturaleza a sangre y fuego.

Pero resulta improbable que tal idea se ajuste a la realidad. Nuestros antecesores eran demasiado pequeños y vulnerables para dominar la sabana. Vivieron bajo la amenaza constante de las jaurías de hienas, de una decena de grandes felinos y de otras bestias peligrosas. Quizá debamos nuestro éxito como especie más a la aptitud para cooperar que a la inclinación a la violencia.

Nuestra actitud cooperativa tiene profundas raíces evolutivas en el reino animal, pero solo la especie humana se organiza en grupos de individuos capaces de lograr hazañas colosales. Solo ella posee la compleja moralidad para poner de relieve las responsabilidades de los demás y hacerlas cumplir a través de la reputación o del castigo. Y, en ocasiones, llevamos a cabo proezas increíbles que desbaratan la idea de que solo actuamos motivados por el interés propio.

MARTIN O'NEILL

Veamos un suceso que tuvo lugar el año pasado en una estación de metro de Washington D.C. La silla de ruedas eléctrica de un pasajero se averió, con tan mala suerte que este acabó tendido sobre los raíles. En segundos, varios testigos saltaron a la vía y lo rescataron antes de la llegada del tren. Un rescate aún más arriesgado tuvo lugar en 2007 en el suburbano de Nueva York cuando Wesley Autrey, un obrero de la construcción de 50 años, salvó la vida a un hombre que cayó a la vía en el momento en que entraba el convoy en la estación. Sin tiempo material para sacarle, Autrey se lanzó a la vía y permaneció sobre el accidentado mientras cinco vagones rodaban por encima de sus cabezas. Luego restó importancia al acto heroico.

Sin duda lo había sido. Pero ¿qué le impulsó a poner en riesgo su vida para salvar a un desconocido en el metro? Para responder a esta pregunta y saber cómo acabamos cooperando de otras maneras, debemos dirigir la mirada hacia nuestros primos evolutivos en busca de conductas similares, en especial a nuestros parientes vivos más próximos: el chimpancé y el bonobo.

LA COOPERACIÓN EN LOS PRIMATES

Con regularidad presencio casos menos dramáticos de cooperación altruista en el Centro Nacional de Primatología Yerkes, de la Universidad Emory. Desde mi despacho se divisa un gran cercado herboso en el que una vieja chimpancé llamada Peony mata el tiempo tomando el sol en compañía de otros iguales. Los brotes de artritis que la aquejan le impiden con frecuencia caminar y trepar. Pero cuando intenta encaramarse al armazón de trepa, una hembra joven sin parentesco con ella se coloca detrás y la empuja hacia arriba apoyando las manos sobre sus anchas nalgas. También hemos visto a otros compañeros llevarle agua, pues para ella caminar hasta el grifo puede resultar agotador: cuando comienza a dirigirse hacia él, otros se le adelantan, toman un trago de agua y se detienen ante ella, que, dispuesta, abre la boca de par en par para que le escupan el chorro.

Numerosos estudios recientes han analizado la cooperación en los primates y llegan a tres conclusiones importantes. La primera es que tal conducta no depende de vínculos familiares. Aunque los simios prefieren a los parientes, la ayuda no se limita a la familia. El análisis del ADN de las heces ha permitido averiguar el parentesco de los chimpancés que cazan y vagan juntos por el bosque: la mayoría de las alianzas fuertes las traban individuos sin lazos familiares. Los amigos se acicalan, se avisan de la presencia de depredadores y comparten el alimento.

En segundo lugar, la cooperación se basa a menudo en la reciprocidad. Los experimentos indican que los chimpancés recuerdan los favores recibidos. Un estudio de una colonia cautiva analizó el acicalamiento matinal antes de la hora de comer. Cuando se ofrecía a los simios alimentos que podían compartir, como sandías, a los afortunados que se hacían con ellas enseguida les rodeaba una multitud de pedigüeños que extendían la mano entre quejidos y lamentos; se comprobó que aquellos que habían acicalado a los afortunados por la mañana tenían más posibilidades de recibir una parte.

En tercer lugar, la cooperación puede estar motivada por la empatía, un rasgo común en todos los mamíferos [*véase* «La empatía en los animales», por Frans B. M. de Waal; MENTE Y CEREBRO n.º 38, 2009]. Nos identificamos con los demás en situaciones de necesidad, dolor o angustia, y ello nos impulsa a prestar ayuda. Ahora se cree que los primates van más allá y se preocupan del bienestar de otros. En un experimento clásico se colocan dos monos juntos y a uno de ellos se le da a escoger entre dos fichas de colores: si elige una de ellas recibe recompensa él, pero si opta por la otra los dos reciben premio. Después de pocas rondas, acaba eligiendo más a menudo la ficha altruista. La preferencia no se basa en el miedo a su vecino, porque precisamente los monos más generosos son los dominantes (y menos temerosos, por tanto).

A veces, como en la prueba anterior, la preocupación por el prójimo no acarrea coste alguno para sí mismo, pero los primates también prestan ayuda aunque suponga un coste elevado, como cuando el acto de generosidad implica perder la mitad del alimento. Se sabe que los chimpancés adoptan a individuos huérfanos o acuden en defensa de otros miembros cuando son atacados por leopardos, acciones altruistas que pueden costar muy caras.

LAS PROFUNDAS RAÍCES DEL ALTRUISMO

La predisposición al altruismo de los primates tal vez surgió a raíz del cuidado maternal que todos los mamíferos dispensan. Ya sea ratón o elefante, la madre ha de responder a las señales

Frans de Waal ostenta la cátedra C. H. Candler de comportamiento de primates en la Universidad Emory y es director del Centro Living Links en el Centro Nacional de Primatología Yerkes.





LOS CAZADORES DE BALLENAS DE LAMALERA, que afrontan codo con codo situaciones de vida o muerte, poseen un profundo sentido de la equidad.

FRED BRUEMMER, GETTY IMAGES

EN SÍNTESIS

La especie humana posee la singular aptitud de cooperar en grupos numerosos y organizados y recurre a una moralidad compleja, basada en la reputación y el castigo.

Gran parte del fundamento de esa cooperación, incluida la empatía y el altruismo, se observa también en nuestros parientes más cercanos, los primates antropomorfos.

La singular aptitud cooperativa de *Homo sapiens* le ha permitido erigirse en la forma de vida dominante del planeta.

de hambre, dolor y miedo de las crías, pues de lo contrario podrían perecer. Esa sensibilidad se extendió a otras relaciones, reforzando los vínculos afectivos, la empatía y la cooperación en el seno de una sociedad más grande.

La cooperación brinda beneficios sustanciales, por lo que no es sorprendente que se extendiera. En el reino animal predomina la cooperación mutualista, que supuestamente alcanza tan amplia difusión porque rinde beneficios inmediatos, como conseguir alimento o repeler a los agresores. Consiste en trabajar juntos en pos de un objetivo obvio que resulta ventajoso para todos, como cuando una jauría de hienas abate un ñu, o una bandada de pelícanos dispuestos en semicírculo consigue cercar con las patas un banco de peces en aguas someras para darse un festín. Esa cooperación se basa en una acción perfectamente coordinada y en el posterior reparto de los beneficios.

A su vez, tales acciones dan pie a conductas cooperativas más refinadas, como la compartición. Si una hiena o un pelícano monopolizasen todas las recompensas, el sistema se desmoronaría. La supervivencia depende de la capacidad de compartir, lo cual explica que tanto los humanos como los animales seamos tan puntillosos con los repartos justos. Los experimentos demuestran que monos, perros y ciertas aves sociales rehúsan el premio cuando es inferior al que otro recibe por la misma tarea; el chimpancé y el hombre van más allá y moderan el reparto de las recompensas para evitar la frustración de terceros. Debemos nuestro sentido de la equidad a la larga historia de cooperación mutualista.

LA SINGULARIDAD HUMANA

El ser humano ofrece ejemplos vívidos del vínculo entre el reparto y la supervivencia. Los habitantes de Lamalera, en Indonesia, se adentran en alta mar en grandes canoas a la caza de ballenas con las manos casi desnudas. Los balleneros reman hacia la presa hasta que el arponero puede saltar sobre su lomo para clavar con todas sus fuerzas el arma, tras lo cual se limitan a seguir de cerca al leviatán hasta que muere desangrado. La vida de muchas familias depende de la pesca, por lo que el buen reparto de la presa está siempre muy presente entre la docena de hombres que ocupan el bote. No sorprende en absoluto que los lamaleranos sean los paladines de la equidad, un atributo que los antropólogos valoran con una herramienta llamada el juego del ultimátum, que mesura la preferencia por las ofertas equitativas. En sociedades con mayor autosuficiencia, como aquellas en las que cada familia dispone de una parcela de tierra, la equidad no es tan importante.

Una de las diferencias aireadas entre los humanos y otros primates es que somos la única especie que coopera con extraños. A pesar de que nuestra disposición a cooperar depende de las circunstancias —después de todo, también matamos a los que no pertenecen a nuestro grupo—, los primates suelen competir entre sí en la naturaleza. El modo en que las comunidades humanas permiten a los desconocidos atravesar su territorio, comparten vituallas con ellos, intercambian bienes y regalos o se alían contra enemigos comunes no es propio de otros primates.

Pero ese aperturismo no exige ninguna explicación evolutiva especial, como algunos pretenden. Seguramente, la cooperación con extraños constituye una prolongación de las tendencias que surgen en el seno de los grupos. En la naturaleza no resulta infrecuente la aplicación de aptitudes fuera del marco original. Un ejemplo lo hallamos en la manera en que los primates emplean las manos para encaramarse a sus madres, una habilidad adquirida en la trepa a los árboles. Experimentos en los que capuchinos y bonobos se relacionan con desconocidos han demostrado su capacidad de intercambiar favores y compartir alimentos. En otras palabras, el potencial para cooperar con extraños está presente en otras especies aunque las situaciones que dan pie a ello sean inusuales en la naturaleza.

Con todo, en un aspecto sí parecemos únicos: la naturaleza altamente organizada de nuestra cooperación. Entablamos colaboraciones jerarquizadas para llevar a cabo proyectos a gran escala de una complejidad y magnitud sin igual en la naturaleza. Pensemos en los arrozales aterrazados del delta del Mekong o en la tecnología que ha permitido construir el Gran Colisionador de Hadrones del CERN.

La mayor parte de la cooperación animal surge de la propia organización. A veces, los animales se reparten los papeles y se coordinan estrechamente. Sucede así cuando un grupo de orcas crea una ola para barrer a una foca del témpano flotante donde descansa; o cuando varios chimpancés macho se dividen en grupos para perseguir y rodear a un grupo de monos pequeños en la copa de los árboles, como si hubieran acordado antes su cometido. No se sabe cómo se crean y se comunican las intenciones en este tipo de cooperación, pero no parecen estar orquestadas por los cabecillas, como resulta habitual en los humanos.

La especie humana también dispone de mecanismos de cooperación que por ahora son inéditos en otras especies. A través del contacto reiterado, nos labramos una reputación como amigos de confianza o, por el contrario, somos castigados si nuestro empeño es flaco. La sombra del castigo también disuade a los individuos de cometer fraudes. En el laboratorio penalizamos a los aprovechados aun a costa de nosotros mismos, práctica que a la larga fomenta la cooperación en el grupo. Existe un gran debate en torno a cuán habitual es el castigo en la vida real, fuera del laboratorio, pero sabemos que nuestros sistemas morales incluyen expectativas sobre la cooperación y que nos mostramos muy sensibles a la opinión pública. Los participantes en un experimento donaron más dinero para una buena causa cuando se vieron observados por un par de ojos dibujados en la pared. Al sentirnos vigilados, nos preocupa nuestra reputación.

Y esa preocupación sobre la reputación podría haber sido el elemento cohesivo que permitió a *Homo sapiens* conformar sociedades más grandes. Durante gran parte de la prehistoria humana, nuestros ancestros llevaron una vida nómada muy similar a la de los actuales cazadores-recolectores. Estos pueblos se inclinan por la paz y el comercio con otras comunidades, lo cual sugiere que los primeros *H. sapiens* compartían esos rasgos.

Sin negar nuestro lado violento, estoy convencido de que esa predisposición para la cooperación es la que nos ha llevado tan lejos. Partiendo de tendencias que surgieron y evolucionaron en los primates no humanos, hemos tejido complejas redes sociales integradas por individuos que cooperan de innumerables formas.

PARA SABER MÁS

The human potential for peace. Douglas P. Fry. Oxford University Press, 2005.
El mono que llevamos dentro. Frans B. M. de Waal. Tusquets Editores, 2007.
The age of empathy. Frans B. M. de Waal. Harmony Books, 2009.
Prosocial primates: Selfish and unselfish motivations. Frans B. M. de Waal y Malini Suchak en *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 365, n.º 1553, págs. 2711-2722; septiembre de 2010.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Por qué cooperamos? Martin A. Nowak en *IyC*, octubre de 2012.

LA PEQUEÑA



FRENTE A FRENTE: A pesar de la diferencia en el volumen cerebral, humanos y chimpancés (*a la derecha, un cráneo de este animal*) comparten un gran número de facultades cognitivas. Los expertos aún debaten sobre qué cualidad clave nos distingue de ellos.

GRAN DIFERENCIA

La capacidad para involucrarnos en tareas comunes complejas —desde cazar grandes presas hasta erigir ciudades— podría haber sido lo que separó a nuestra especie del resto de los primates

Gary Stix





Gary Stix, editor de *Scientific American*, está especializado en neurociencia.



En un laboratorio de Leipzig, dos niños de muy corta edad observan unos ositos de gominola colocados en una tabla que está fuera de su alcance. Para conseguirlos deben tirar a la vez de los dos extremos de una cuerda. Si solo lo hace uno de ellos, ambos se quedarán sin nada.

A pocos kilómetros de distancia, en el zoológico de la ciudad, los investigadores repiten el experimento con dos chimpancés. Si los simios superan el test de la cuerda y la tabla, obtendrán una fruta.

Mediante tales experimentos, los científicos esperan resolver un interrogante que les desconcierta: ¿por qué los humanos hemos tenido tanto éxito como especie? Si *Homo sapiens* y *Pan troglodytes* comparten cerca del 99 por ciento de su material genético, ¿por qué el ser humano ha poblado casi todos los rincones del planeta, construyendo a su paso la torre Eiffel, Boeing 747 y bombas H? ¿Por qué los chimpancés de África ecuatorial aún forrajean para procurarse la cena, tal y como hacían sus antepasados hace siete millones de años, cuando los humanos arcaicos y los grandes simios se separaron en distintas especies?

Al igual que ocurre con todo acontecimiento relacionado con la evolución, cuya escala temporal típica asciende a cientos de miles o millones de años, puede que los expertos nunca lleguen a averiguar qué sucedió. Durante años ha prevalecido la tesis de que la diferencia se debe a nuestra capacidad de fabricar y usar herramientas, así como a la de razonar mediante números y otros símbolos. Sin embargo, a medida que ha aumentado nuestro conocimiento sobre otros primates, esa idea ha ido descartándose. Un chimpancé que disponga de un instructor adecuado puede aprender a sumar, manejar un ordenador y encender un cigarrillo.

Hoy por hoy, la cuestión de por qué y en qué medida el comportamiento humano difiere del de los grandes simios es aún objeto de debate. Pero gracias a experimentos como el de Leipzig, auspiciado por el Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva (MPI-EVA, por sus siglas en alemán), los investigadores han identificado la que tal vez constituya la faceta distintiva del aparato cognitivo humano. Una que, sin embargo, pasa inadvertida con facilidad.

Antes de cumplir su primer año, en un hito que algunos psicólogos denominan «la revolución de los nueve meses», los niños comienzan a mostrar una aguda conciencia sobre lo que ocurre en la cabeza de sus padres. Manifiestan esa capacidad siguiendo la mirada de sus progenitores o dirigiendo la vista hacia donde estos señalan. Hasta cierto punto, también los chimpancés pueden imaginar qué sucede en la mente de un congénere. Sin embargo, los humanos llevamos esa facultad un paso más allá. Tanto niños como adultos pueden poner en común sus mentes y colegir qué deberían hacer para ejecutar una tarea en común. El sencillo pasatiempo en que un adulto y un niño se pasan una pelota resulta posible gracias a esta sutil ventaja cognitiva.

Algunos psicólogos y antropólogos creen que, hace cientos de miles de años, esa capacidad para unir mentes pudo acabar determinando la evolución de nuestra especie. El talento que mostraban los pequeños grupos de cazadores-recolectores a la hora de trabajar juntos habría desencadenado una serie de cambios cognitivos que, a la postre, dieron lugar al desarrollo del lenguaje y a la propagación de las diferentes culturas por todo el mundo.

Esta manera de ver la evolución psicológica humana, inferida a partir de estudios con niños y chimpancés, es aún especulativa y tiene sus detractores. Con todo, tal vez sea la hipótesis que brinda un panorama más amplio para describir el origen de las facultades cognitivas que hacen tan especiales a los humanos.

EL EFECTO TRINQUETE

El MPI-EVA acoge las mayores instalaciones del mundo dedicadas a explorar las diferencias conductuales entre humanos y grandes simios. En un momento dado, en el instituto pueden estar realizándose docenas de estudios. A fin de seleccionar a

EN SÍNTESIS

Hasta hace poco, se pensaba que lo que distinguía a los humanos de otras especies era su singular capacidad para usar herramientas y una superioridad general en sus facultades cognitivas. Un examen detallado del comportamiento de chimpancés y otros grandes simios ha demostrado que esta idea es errónea.

Chimpancés y niños puntúan casi por igual en las pruebas destinadas a evaluar sus facultades generales de razonamiento. Sin embargo, y a diferencia de los humanos, los chimpancés no colaboran en grandes grupos, un requisito imprescindible para desarrollar las sociedades complejas que nos caracterizan como especie.

Varios estudios han comparado los procesos psicológicos de humanos y chimpancés. Según algunos investigadores, una diferencia esencial entre ambas especies radicaría en la capacidad humana para figurarse qué piensan otros individuos. Gracias a ella, podemos unir esfuerzos y alcanzar objetivos comunes.

PÁGINAS ANTERIORES: INGO ARNDT, GETTY IMAGES

ESTRATEGIA GANADORA: Varios estudios han intentado comparar la capacidad de humanos y chimpancés para realizar tareas en común. En el experimento de la imagen, los dos individuos deben tirar a la vez de los extremos de una cuerda para obtener el premio (ositos de gominola o fruta, según el caso). Si uno de los miembros del equipo tira pero el otro no, la cuerda se desliza y ambos quedan sin recompensa.



DANIEL ROSENTHAL

los sujetos más adecuados para cada prueba, los investigadores disponen de una base de datos de más de 20.000 niños. Al mismo tiempo, pueden reclutar chimpancés y otros grandes simios (orangutanes, bonobos y gorilas) del Centro de Primatología Wolfgang Köhler, en el zoológico de Leipzig.

El instituto se creó hace diecisiete años, siete después de la reunificación alemana. Sus fundadores hubieron de hacer frente a la triste herencia de la antropología alemana y su asociación con las teorías raciales nazis y, en especial, con los atroces experimentos de Josef Mengele, médico y doctor en antropología. Por esa razón, se afanaron en contratar a científicos de origen no alemán para dirigir los grupos de genética, primatología, lingüística y otras disciplinas.

Uno de ellos fue Michael Tomasello. Hoy con 64 años, este psicólogo y primatólogo oriundo de Florida comenzó su carrera académica en la Universidad de Georgia con una disertación sobre la adquisición del lenguaje en los niños. Durante su doctorado, en los años setenta, no pocos lingüistas y psicólogos otorgaban al lenguaje el primer puesto en la lista de cualidades que hacen tan excepcionales a los humanos.

En su tesis, Tomasello explicaba cómo su hija de casi dos años había aprendido los primeros verbos. La irrupción de las primeras protopalabras (locuciones como *play-play* o *ni-ni*) revelaba la inclinación natural de la niña a embarcarse en pruebas de ensayo y error. De manera gradual, aquel ejercicio acabaría permitiéndole desarrollar estructuras gramaticales y sintácticas. Ese proceso contrastaba con las tesis de Noam Chomsky y otros lingüistas, quienes defendían que, de algún modo, la gramática se encuentra genéticamente engastada en el cerebro humano. A Tomasello, esa explicación se le antojaba demasiado reduccionista. «El lenguaje es algo tan complejo que no pudo haber evolucionado del mismo modo que el pulgar oponible», sostiene el investigador.

Sus estudios acerca del lenguaje le condujeron a considerar la relación entre cultura y evolución. Tomasello dedujo que, por sí sola, la presión selectiva sobre los rasgos físicos no podía bastar para explicar que, en el breve intervalo transcurrido desde que chimpancés y humanos se separaron, apareciesen las herramientas, el lenguaje, las matemáticas o una organización social compleja. Alguna cualidad mental ausente en los primates no humanos pero innata a los homininos (el grupo que incluye al humano moderno y a sus parientes cercanos extintos) debió posibilitar que nuestros antepasados acelerasen el desarrollo de nuevas técnicas para alimentarse, vestirse y prosperar en casi cualquier entorno, por hostil que fuera.

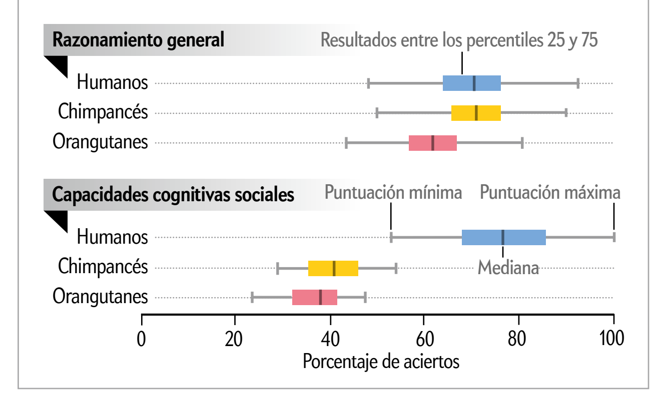
En los años ochenta, Tomasello consiguió una plaza en la Universidad Emory y se sirvió del Centro Nacional de Primatología Yerkes, situado en el mismo campus, para comparar el comportamiento de niños y chimpancés. Con ello dio comienzo a un trabajo de varias décadas que, en 1998, le llevó al Instituto Max Planck de Leipzig.

Al estudiar el proceso de aprendizaje en los chimpancés, el investigador observó que estos simios no se imitaban unos a otros del mismo modo en que lo hacemos los humanos. Un chimpancé puede emular a un compañero y usar un palo para extraer hormigas del suelo; después, otros miembros del grupo tal vez hagan lo mismo. Pero, al examinar el fenómeno con mayor detenimiento, Tomasello dedujo que, por más que un chimpancé esté facultado para entender esa manera de usar el palo, no mostrará ningún interés en remedar otras técnicas para cazar insectos. Más importante aún: no intentará ir más allá de lo básico ni perfeccionará el instrumento.

PRUEBAS DE INTELIGENCIA

¿Listo como un chimpancé?

Una hipótesis muy aceptada sostiene que los humanos somos más inteligentes que otros primates. Hace unos años, un estudio halló que chimpancés y niños pequeños rendían por igual en las pruebas destinadas a evaluar las facultades cognitivas tradicionales, como la inteligencia espacial o la cuantitativa (*arriba*). No obstante, los niños puntuaron más alto en las pruebas relacionadas con las habilidades sociales, como la capacidad para aprender de los demás (*abajo*).



FUENTE: «HUMANS HAVE EVOLVED SPECIALIZED SKILLS OF SOCIAL COGNITION: THE CULTURAL INTELLIGENCE HYPOTHESIS», POR ESTHER HERRMANN ET AL., EN *SCIENCE*, VOL. 317, 7 DE SEPTIEMBRE DE 2007

Muy al contrario, la innovación sí constituye un rasgo característico de las sociedades humanas. En nuestra especie se observa lo que Tomasello denomina «efecto trinquete»: modificamos nuestras herramientas, las mejoramos y transmitimos ese conocimiento a la siguiente generación, que a su vez hará lo propio. De esta manera, lo que comienza siendo un proyectil de piedra para cazar mamuts acaba convirtiéndose, milenios después, en una honda, una catapulta y un misil balístico.

Ese trinquete cultural explica a grandes rasgos el éxito de los humanos como especie. Sin embargo, plantea otra cuestión: ¿qué procesos mentales toman parte en esa transmisión de conocimientos? Para responder a esta pregunta, debemos especular sobre los posibles cambios que, hace cientos de miles de años, operaron en la fisiología y el comportamiento de los homininos. La hipótesis del cerebro social, propuesta por el antropólogo de la Universidad de Oxford Robin Dunbar, sostiene que las dimensiones del grupo y, por tanto, la complejidad cultural, aumentan a medida que lo hace el tamaño del cerebro. Hace 400.000 años, *Homo heidelbergensis* —probablemente, uno de los antepasados directos de *Homo sapiens*— tenía un encéfalo casi tan voluminoso como el nuestro.

Tomasello propone que los primeros homininos, dotados de un cerebro mayor y enfrentados a la necesidad de alimentar a una población creciente, fueron desarrollando mejores estrategias para rastrear y engañar a sus presas de caza. Las circunstancias ejercieron una fuerte presión selectiva hacia la cooperación: si un miembro no colaboraba con el grupo, asumiendo un papel bien definido a la hora de acorralar a un animal, se vería excluido de batidas posteriores y habría de afrontar un aciago futuro en solitario. Para Tomasello, lo que separó a los humanos del resto de los homininos fue una adaptación evolutiva hacia la «hipersociabilidad».

Dado que el registro paleoarqueológico de huesos y utensilios resulta demasiado escaso para poner a prueba la hipótesis de Tomasello, el investigador experimenta con niños y chimpancés.

Al comparar a nuestro pariente primate más cercano con un niño que aún no domina el lenguaje ni ha recibido educación formal, resulta posible evaluar las facultades cognitivas que todavía no han sido moldeadas por la cultura y que, por tanto, pueden considerarse innatas.

Las investigaciones llevadas a cabo en el MPI-EVA han revelado más similitudes que diferencias entre humanos y chimpancés. Sin embargo, también han sacado a la luz la que Tomasello califica como «pequeña gran diferencia». Esther Herrmann, del departamento de psicología comparada y del desarrollo del MPI-EVA, dirigió un gran proyecto de investigación que se prolongó entre 2003 y 2007, año en que los resultados aparecieron en *Science*. En él, se efectuaron múltiples pruebas cognitivas a 106 chimpancés en dos reservas naturales en África, 32 orangutanes en Indonesia y 105 niños de dos años y medio en Leipzig.

Los investigadores se proponían determinar si el hecho de contar con un cerebro más voluminoso implicaba una mayor inteligencia por parte de los niños y, de ser el caso, precisar el significado de «inteligencia» en este contexto. A tal fin, sometieron a las tres especies a pruebas para medir su razonamiento espacial (como buscar una recompensa escondida), su capacidad para discriminar entre cantidades grandes y pequeñas y para comprender relaciones de causa y efecto. En todos los casos, niños y chimpancés obtuvieron resultados casi idénticos (los orangutanes no salieron tan bien parados).

El ser humano posee una capacidad única para tomar conciencia de los pensamientos de otra persona: una cualidad clave para planear un objetivo común, ya sea transportar un tronco o construir un rascacielos

En lo referente a las capacidades sociales, sin embargo, no hubo punto de comparación. Los niños superaron tanto a chimpancés como a orangutanes en todas aquellas pruebas —adaptadas al lenguaje no verbal de los simios— pensadas para evaluar la capacidad de comunicación, de aprender de otros y de valorar las percepciones y deseos de los demás. Según los autores, esos resultados mostraban que los niños no nacen con un mayor cociente intelectual; es decir, con mayores capacidades para el razonamiento general. Sin embargo, sí poseen todo un abanico de facultades que, más tarde, les permitirán aprender de padres, maestros y compañeros de juegos, lo que el artículo de *Science* llamaba «inteligencia cultural». «Fue la primera demostración de que nuestras capacidades cognitivas sociales son las que realmente nos diferencian de otros animales», apunta Herrmann [*véase* «Sentimiento social en pañales», por Christian Wolf; Mente y cerebro n.º 54, 2012].

Para estudiar el fenómeno en mayor profundidad, los investigadores debían esclarecer qué procesos psicológicos subyacen a esa enorme predisposición para socializar. El trabajo de Tomasello demostró que, hacia los nueve meses, los niños ya comparten con sus progenitores cierta capacidad para leer la mente del otro. A esa edad cuentan con lo que los psicólogos denominan una «teoría de la mente»; es decir, con la facultad para tomar conciencia de qué sabe otra persona cuando, por ejemplo, ambos juegan con una pelota. En esa situación cada uno tiene una imagen mental del objeto, del mismo modo en que todos los miembros de un grupo de *Homo heidelbergensis* podían ver en un ciervo una representación de la cena.

Esa capacidad de embarcarse con otra persona en un juego u otra actividad es lo que Tomasello llama «intencionalidad compartida», término que ha tomado prestado de la filosofía. Según explica, se trataría de una adaptación evolutiva exclusiva del ser humano. Una pequeña diferencia de consecuencias monumentales, arraigada en una predisposición innata para la interacción social cooperativa.

INDAGAR EN MENTE AJENA

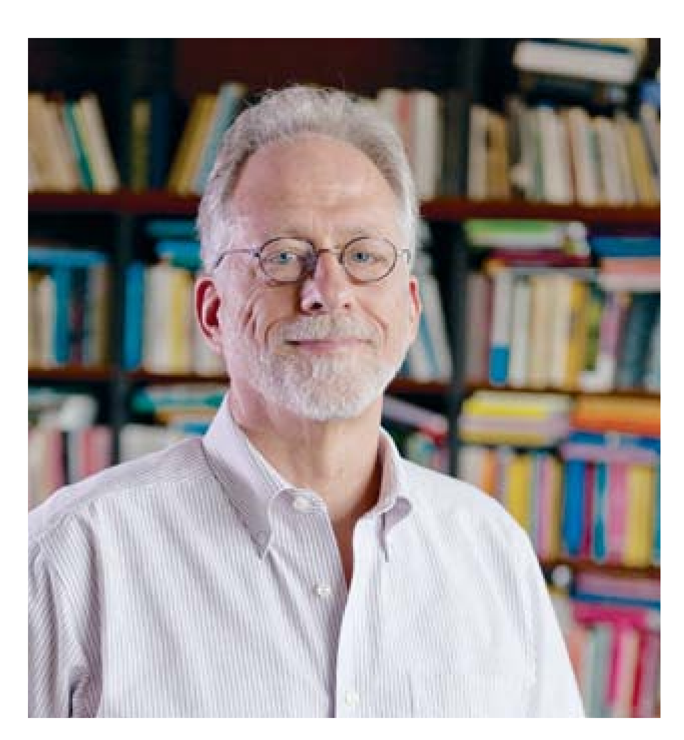
Hasta cierto punto, también los chimpancés pueden leer la mente de sus congéneres. Sin embargo, su inclinación natural consiste en usar esa información para vencer a un competidor en la búsqueda de comida o pareja. Según Tomasello, los chimpancés adoptan esquemas mentales maquiavélicos, del estilo de «si yo hago esto, ¿hará él esto otro?». En octubre de 2010, durante una charla en la Universidad de Virginia, el investigador apuntaba que resultaría inconcebible ver a dos chimpancés transportando un tronco juntos.

Las diferencias entre una especie y otra quedaron patentes en el experimento de la cuerda y la tabla. En él, dos chimpancés podían alcanzar una fruta solo si ambos tiraban a la vez de una cuerda atada a un tablón. Si la comida se colocaba en uno de los dos extremos, el primate que tenía la fruta más cerca la agarraba. Si se situaba en el medio, el simio dominante acababa haciéndose con la comida y, tras varios intentos, el compañero dejaba de intentarlo. Pero, al llevar a cabo el experimento equivalente con niños, se comprobó que estos cooperaban tanto si los ositos de gominola se encontraban en el medio como si se situaban en los extremos del tablero. En el primer caso, los niños de tres años negociaban para repartirse el premio a partes iguales.

Tomasello cree que el ancestral entendimiento entre humanos para llevar a cabo una tarea común habría establecido las bases para la interacción social y para una cultura fundada en la cooperación. Ese «punto de partida», como él lo denomina, que permite que cada miembro de un grupo se haga una idea de qué saben los demás, tal vez abriese la puerta a nuevas formas de comunicación.

Una capacidad para concebir y percibir objetivos comunes, así como para intuir de inmediato qué pensaban los otros cazadores, habría permitido a los homininos dar saltos cognitivos novedosos, como refinar el uso comunicativo del gesto. Puede que el repertorio gestual básico de los primeros homininos se asemejase al de los grandes simios. Al igual que los chimpancés actuales, tal vez señalasen con la mano para expresar órdenes como «dame esto» o «haz aquello». Semejante forma de comunicación, sin embargo, se encuentra centrada en las necesidades del individuo. Los chimpancés nunca emplean tales gestos para enseñar a un congénere ni para transmitirle información.

En el caso de los humanos, el poder comunicativo del gesto se habría ido ampliando a medida que mejoraban sus facultades mentales. Por ejemplo, un cazador podía señalar un claro en el



MICHAEL TOMASELLO, investigador del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Leipzig, ha completado algunos de los primeros estudios a gran escala sobre las diferencias entre humanos y chimpancés.

bosque para indicar que allí pastaba un ciervo, y un compañero cercano lo entendería de inmediato. En la vida moderna, los nuevos significados que puede tomar un mismo gesto resultan evidentes. «Si señalo a cierto lugar para indicar "vamos allí a tomar un café", el significado de "esa cafetería" está en el dedo, no en el lenguaje», ejemplifica Tomasello.

Los niños pequeños entienden ese tipo de indicaciones, pero los chimpancés no. La diferencia quedó patente en un experimento en el que los niños debían construir una torre con bloques que el investigador iba depositando sobre una bandeja. Cuando los ladrillos se acababan, los pequeños señalaban la bandeja vacía para indicar que querían más: sabían que el adulto interpretaría el gesto de la manera correcta. De hecho, la capacidad para referirse a una entidad ausente constituye una característica definitoria del lenguaje humano. Pero, al someter a los chimpancés del zoológico a la misma prueba (con comida en lugar de con bloques), estos no levantaban el dedo cuando encontraban la bandeja vacía.

Los niños apenas un poco mayores ya comienzan a entender gestos que imitan acciones, como llevarse una mano a la boca para expresar hambre o sed. Cuando un chimpancé ve tales pantomimas, no sabe en absoluto qué significan. Un simio puede comprender qué ocurre cuando una persona golpea una nuez con un martillo para extraer el fruto, pero no que una persona se atice en la mano para simbolizar la misma acción.

Ese tipo de gesticulación —una extensión de la capacidad humana para la intencionalidad compartida— pudo haber sentado las bases para comunicar ideas abstractas, algo necesario para engendrar estructuras sociales más elaboradas, desde tribus hasta naciones. Los gestos tal vez contribuyesen a crear líneas narrativas. Para comunicar «el antílope está pastando al otro lado de la colina», un individuo podía representar el animal poniendo las manos en forma de V sobre su cabeza y, después, subir y bajar el brazo para simbolizar la colina. Varios experimentos comparativos han demostrado que los niños pequeños comprenden de manera intuitiva los gestos icónicos asociados a actividades familiares, algo que no ocurre con los chimpancés.

Puede que los primeros aspavientos se viesen acompañados de una vocalización para distinguir entre objetos o acciones, y que, más tarde, esos sonidos guturales diesen lugar al habla. A medida que las poblaciones crecían y surgían rivalidades entre ellas, habría aumentado la capacidad para manejar relaciones sociales complejas, ya que una comunidad acostumbrada a trabajar en equipo superaría con facilidad a otras cuyos miembros tuviesen problemas para entenderse.

Esa mejora en las facultades cognitivas pudo haber promovido conductas específicas para la caza, la pesca, la recolección de plantas o el matrimonio. Con el tiempo, estas acabaron convirtiéndose en convenciones culturales que se esperaba que adoptasen todos los miembros del grupo. Un conjunto de normas sociales requería que cada individuo tomase conciencia de los valores compartidos por la comunidad: una especie de «conciencia de grupo» que facilitaría que cada miembro se ajustase al papel que se esperaba de él. Las normas sociales habrían dado lugar a un esquema de principios morales que, en última instancia, sentaría las bases de marcos institucionales como gobiernos, ejércitos, sistemas legales y religiosos, encargados de garantizar el cumplimiento de las reglas. En definitiva, un viaje milenario que comenzó con un repertorio de facultades cognitivas ventajosas para cazar en grupo y que, con el tiempo, acabó engendrando sociedades enteras.

Los grandes simios nunca comenzaron a andar ese camino. Es cierto que los chimpancés de Costa de Marfil cazan y asedian juntos a los colobos. Sin embargo, Tomasello cree que, en realidad, cada chimpancé intenta ser el primero en arrollar a la presa para conseguir la mayor cantidad de comida posible. Los cazadores recolectores humanos actuales, sin embargo, cooperan para perseguir a las grandes presas y se reparten después el botín de manera equitativa. El investigador interpreta que, aunque los grupos de simios y otros animales, como los leones, adopten un comportamiento de apariencia cooperativa, en última instancia su dinámica reviste un carácter competitivo.

EL GRAN DEBATE

La versión evolutiva de Tomasello no goza de aceptación universal, tampoco en el MPI-EVA. Un piso más arriba, en el departamento de primatología, Catherine Crockford me habla de un vídeo que su estudiante de posgrado Liran Samuni grabó el pasado mes de marzo y que muestra a un chimpancé joven en el parque nacional de Taï, en Costa de Marfil.

El animal, al que los investigadores llaman Shogun, acaba de atrapar a un gran mono colobo blanco y negro. Ante las dificultades para devorar a la víctima, que se retuerce aún viva, Shogun profiere agudos gritos para solicitar la ayuda de dos cazadores veteranos. Kuba, uno de ellos, llega raudo, y Shogun, un poco más calmado, puede por fin catar su presa. Pero, después, Shogun continúa gritando hasta que aparece el otro cazador, Ibrahim. El joven simio le pone a Ibrahim el dedo en la boca: un «gesto de confortación» que significa que todo va bien. Ibrahim proporciona el apoyo emocional solicitado no mordiendo el dedo de Shogun. Después, los tres comparten el almuerzo. «Es interesante que llame a esos dos machos dominantes que podrían arrebatarle toda la presa», explica Crockford. «Pero, como puede observarse, no se la quitan. Le permiten comer.»

Crockford sostiene que aún es demasiado pronto para extraer conclusiones sobre el alcance de la cooperación entre los simios. «No creo que sepamos hasta dónde pueden llegar los chimpancés. Creo que los argumentos [de Tomasello] son brillantes y muy claros en el marco de nuestros conocimientos actuales. Pero, con las nuevas herramientas que estamos implementando en este campo, descubriremos si las capacidades que atribuimos a los chimpancés se limitan a lo que sabemos ahora», explica la investigadora. Crockford trabaja con otros investigadores para desarrollar métodos que aíslen la oxitocina, la hormona del gregarismo social, en la orina del chimpancé. Algunos estudios han mostrado que sus niveles aumentan cuando los animales comparten comida, lo que indicaría un comportamiento cooperativo.

Crockford hizo su doctorado en Leipzig con Tomasello y Christophe Boesch, director del departamento de primatología del MPI-EVA. Boesch argumenta contra las conclusiones de Tomasello a partir de sus propias investigaciones en el parque nacional de Taï, que pusieron de relieve la estructura social colaborativa de los chimpancés. Al cazar, por ejemplo, uno dirige a la presa en la dirección deseada y otros bloquean su paso, entre otras funciones. Las tesis de Boesch sobre la cooperación entre chimpancés recuerdan a las de Frans de Waal, del Centro Nacional de Primatología Yerkes [*véase* «Raíces del espíritu cooperativo», por Frans de Waal, *en este mismo número*].

Más allá de las diferencias psicológicas, las investigaciones futuras abordarán el posible origen genético de los rasgos cognitivos en humanos, chimpancés e incluso neandertales

También hay quienes critican a Tomasello desde el ángulo opuesto. Daniel Povinelli, de la Universidad de Louisiana en Lafayette, cree que exagera las habilidades cognitivas de los chimpancés cuando sugiere que, al menos hasta cierto punto, estos animales pueden entender el estado psicológico de los demás miembros del grupo. Por su parte, Tomasello parece disfrutar de encontrarse en medio de este torneo académico: «Para mí, Boesch y De Waal antropomorfizan a los simios y Povinelli los trata como ratas. No son ninguna de las dos cosas», explica. Y añade jocosamente: «Estamos en el medio. Y dado que nos atacan por igual desde ambos flancos, será que tenemos razón».

Esas condenas quedan atenuadas por el profundo respeto que recibe de otros investigadores. «Siempre había pensado que los humanos eran muy parecidos a los chimpancés», reconoce Jonathan Haidt, destacado científico social de la facultad de ciencias empresariales Stern, en la Universidad de Nueva York. «Pero, con los años, y gracias en gran parte al trabajo de Tomasello, he llegado a la conclusión de que la pequeña diferencia que él ha estudiado y publicitado —la capacidad única de los humanos para la intencionalidad compartida— fue lo que nos llevó al otro margen del río, donde la vida social es radicalmente distinta.»

La última palabra llegará con más investigaciones en el zoológico, en el laboratorio y con simios en libertad, así como quizá con nuevos estudios que indaguen hasta qué punto los chimpancés tienen una teoría de la mente. El grupo de Tomasello ha comenzado un nuevo trabajo para averiguar si sus conclusiones sobre el comportamiento humano, extraídas a partir de experimentos con niños alemanes, pueden seguir aplicándose al caso de preescolares africanos o asiáticos. Uno de esos estudios abordará si los niños alemanes y los samburu, un pueblo seminómada del norte de Kenia, comparten el mismo sentimiento colectivo sobre lo que está bien y lo que está mal.

Por otro lado, tal vez quepa seguir investigando las diferencias entre simios y humanos. Josep Call, director del Centro de Primatología Wolfgang Köhler y uno de los más antiguos y cercanos colaboradores de Tomasello, cree que la intencionalidad compartida tal vez no baste para dar cuenta de nuestra singularidad. Quizás haya otras facultades cognitivas que también nos distingan de los primates, como nuestra capacidad para viajar mentalmente en el tiempo e imaginar el futuro.

Otra perspectiva desde la que investigar las similitudes entre personas y chimpancés pasa por estudiar el cerebro humano, tarea que ya está en marcha en otra de las plantas del Max Planck. Svante Pääbo, que dirigió el equipo que en 2010 efectuó una primera secuenciación del genoma del neandertal, ha conjeturado en un libro reciente que las teorías de Tomasello acerca del pensamiento humano podrían ponerse a prueba mediante análisis genéticos.

Un lugar natural desde el que comenzar tales investigaciones sería conjugar los estudios sobre chimpancés y humanos con los intentos por entender las raíces genéticas del autismo. Los niños que padecen este trastorno presentan sus propias dificultades para entender los usos sociales. Comparar su genoma con el de quienes no padecen la enfermedad —y, después, con el de chimpancés y tal vez con el de neandertales— tal vez ayude a comprender las bases genéticas de la sociabilidad humana.

Todas estas investigaciones quizá nos permitan entender por qué, en un viaje que ha durado milenios, nuestra especie dejó de estar compuesta por grupos de cazadores-recolectores y llegó a formar sociedades que no solo proporcionan a sus miembros comida y cobijo de un modo mucho más eficiente que los chimpancés, sino que les brindan innumerables oportunidades para socializar: desde llegar a cualquier esquina del planeta en menos de un día hasta transmitir un mensaje de una punta a otra del globo con la misma rapidez con que un pensamiento se nos viene a la cabeza.

PARA SABER MÁS

Cultural origins of human cognition. Michael Tomasello. Harvard University Press, 1999.
Humans have evolved specialized skills of social cognition: The cultural intelligence hypothesis. Esther Hermann et al. en *Science*, vol. 317, págs. 1360-1366, septiembre de 2007.
A natural history of human thinking. Michael Tomasello. Harvard University Press, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

La aparición de la mente moderna. Kate Wong en *IyC*, agosto de 2005.
Orígenes del pensamiento. Informe especial. VV.AA. en *IyC*, febrero de 2012.
De primitivos a humanos. Thomas Grüter en *MyC* n.º 60, 2013.



LAS RAÍCES de nuestra peculiar forma de crianza pueden entenderse, en parte, al estudiar el comportamiento de algunos grupos actuales de cazadores-recolectores, como las tribus de bosquimanos. Las madres acarrean de forma constante a sus hijos hasta casi los tres o cuatro años, lo que facilita la lactancia a demanda.

LA RECETA HUMANA DE LA CRIANZA

No existe una única forma de alimentar y proporcionar cuidados a nuestros retoños. En la peculiar crianza humana hallamos rasgos procedentes de nuestra ascendencia primate y otros que ha ido incorporando nuestro linaje evolutivo, entre ellos la cooperación

Ana Mateos

EN SÍNTESIS

La crianza humana, caracterizada por la enorme inversión de tiempo y esfuerzo que destinamos a nuestra descendencia, resulta singular entre los primates.

Las limitaciones ecológicas, energéticas y fisiológicas que hemos hallado a lo largo de nuestra evolución han configurado nuestro modelo actual de crianza.

Un rasgo que nos distingue de nuestros parientes primates más próximos es la colaboración de otros miembros del grupo en la atención de los hijos. A pesar de la dificultad que entraña el estudio de la crianza en el pasado, se han propuesto varias explicaciones sobre el origen y evolución de esta peculiar conducta en nuestra especie.



Ana Mateos Cachorro, doctora en prehistoria y máster en primatología, es responsable del grupo de paleofisiología y ecología humana en el Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana, en Burgos.



TODOS ACEPTAMOS QUE LA MADRE ES LA PRINCIPAL CUIDADORA DE sus retoños, al menos en los primeros meses de vida. Ello es probablemente fruto del cóctel de hormonas femeninas (estrógeno, progesterona y prolactina) que hace a las progenitoras instintivamente madres.

Pero si pensamos por un momento en aquel remoto tiempo en el que fuimos niños, tal vez recordaremos también estar entre los brazos de nuestro padre, hermanos, abuelas, tías... No es casualidad que nos hayan criado así. Forma parte de nuestra identidad humana, en la que se incluyen los elementos esenciales de un primate.

Los humanos hemos evolucionado como criadores cooperativos en situaciones en las que las madres confiaron la atención a otros individuos de su grupo para asegurar el aprovisionamiento de recursos alimentarios, sociales y emocionales a su prole. Hablar de crianza cooperativa es referirse a los cuidados compartidos que ofrecen otros cuidadores, además de la madre. Este concepto ha generado una extensa bibliografía desde diferentes disciplinas y, en ocasiones, ha llevado a debates que todavía no se han resuelto, en especial, por lo que se refiere a la definición de la crianza aloparental en los humanos y a los miembros del grupo que participan en ella. Cuando una madre decide delegar el cuidado de la cría en otros, aparte del padre, las razones de parentesco son el argumento de más peso, aunque también pueden ayudar otros cuidadores que no son parientes.

Los modelos para entender la crianza en nuestra historia evolutiva vienen de la mano de la biología evolutiva del desarrollo (*evo-devo*) y de la ecología humana. Estas disciplinas, junto al reciente conocimiento de la sociobiología de los primates y la ecología del comportamiento de los grupos actuales de cazadores-recolectores, nos ofrecen el contexto explicativo de algunas de las peculiaridades de un primate como nosotros. A pesar de los distintos enfoques, la cuestión más interesante es cómo los factores biológicos y los psicosociales y culturales influyen en la crianza, un comportamiento sobre el que habitualmente no reflexionamos y sobre el que siempre pensamos que fue tal y como lo conocemos hoy.

A lo largo de muchos millones de años de evolución, nuestro linaje ha ido modelando un particular estilo de crianza que nos ha garantizado el futuro como especie. En el presente artículo, realizamos un viaje evolutivo para buscar las pistas del origen de la crianza humana. Iniciamos el recorrido analizando el vínculo ancestral de esa conducta en otros primates, pasando por el estudio de los grupos de cazadores-recolectores y de nuestros antepasados del Pleistoceno hasta llegar a nuestras sociedades del siglo XXI.

CUIDADOS PARENTALES EN LOS PRIMATES

Algunos comportamientos podrían considerarse los principales ingredientes de la receta de la crianza. Todos sabemos cuán importantes son las cantidades precisas de los alimentos a la hora de cocinar, si bien la calidad de cada uno de ellos también resulta fundamental. El tiempo que la madre pasa en estrecho contacto con las crías, la duración de la lactancia y el tiempo de respuesta al llanto convendrían en ser la masa madre de los cuidados maternales, según se ha propuesto en numerosos estudios clásicos sobre la crianza en los mamíferos.

En los primates, estos elementos se hallan presentes en numerosas especies. De este modo, el contacto físico entre la madre y su retoño es constante en los grandes simios y en los humanos. Se trata de una buena estrategia evolutiva de supervivencia para la cría, ya que la protege frente a peligros externos como la escasez de alimentos, enfermedades, parásitos, predadores o individuos infanticidas. Por otra parte, las crías lactan a demanda, casi cada 10 o 15 minutos. Las madres que siempre portan a sus bebés encima durante sus actividades diarias aseguran que el flujo de leche sea casi constante. Aunque los primates raramente lloran, la respuesta al llanto del bebé es casi inmediata debido al estrecho contacto físico. Cualquier signo de molestia es atajado enseguida. Tal respuesta sucede también en horas nocturnas. Muchas especies de primates duermen con sus crías hasta que son destetadas o, incluso, algún tiempo después.

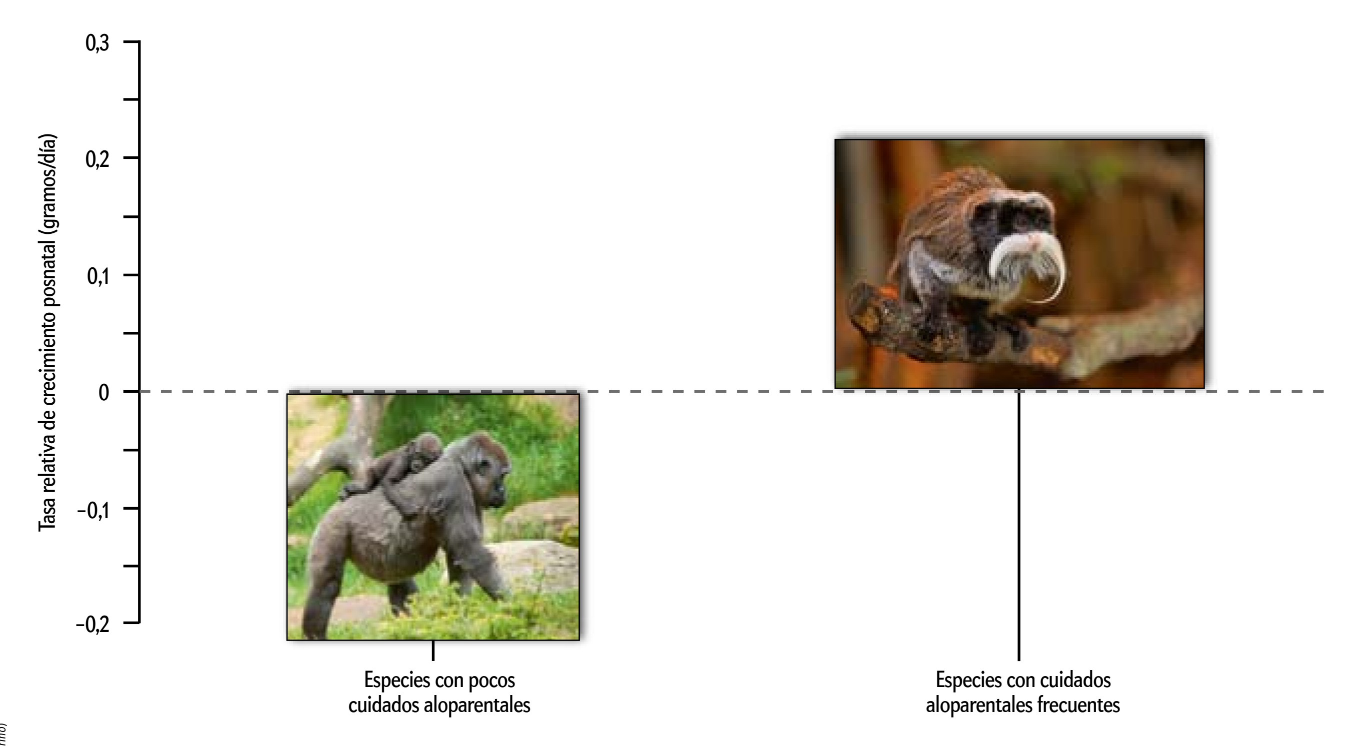
Sin embargo, este comportamiento materno no es uniforme en todos los primates. Las hembras de los prosimios (suborden de los primates que incluye a lémures, loris y tarseros) «aparcan» a sus crías mientras salen a conseguir alimento. Debido a que producen una leche muy rica en grasa, aseguran con pocas tomas el sustento de sus vástagos, que pueden soportar así largos períodos de abandono.

La colaboración de otros miembros del grupo ejerce un papel fundamental en la crianza. Los estudios de Caroline Ross, de la Universidad de Surrey Roehampton, han demostrado que las especies de primates con un alto índice de cuidados aloparentales crecen más rápidamente en la etapa posnatal y destetan a sus crías a una edad más temprana que las especies de tamaños similares con bajos índices de cuidados aloparentales. La menor duración de la lactancia permite una mayor tasa de nacimientos, motivo por el cual la evolución habría favorecido esta estrategia de crianza compartida.

Pero en los primates, como en otros mamíferos, los estilos de crianza compartida varían mucho de una especie a otra. En las más solitarias, como es el caso de los orangutanes, no existen muchas oportunidades para este comportamiento. Los chimpancés y bonobos, aunque mucho más sociables, también se muestran reticentes a compartir por completo el cuidado de su cría, pues la madre siempre está cerca de ella o de quien la cuida. En estos tres primates, las madres exhiben una actitud muy protectora.

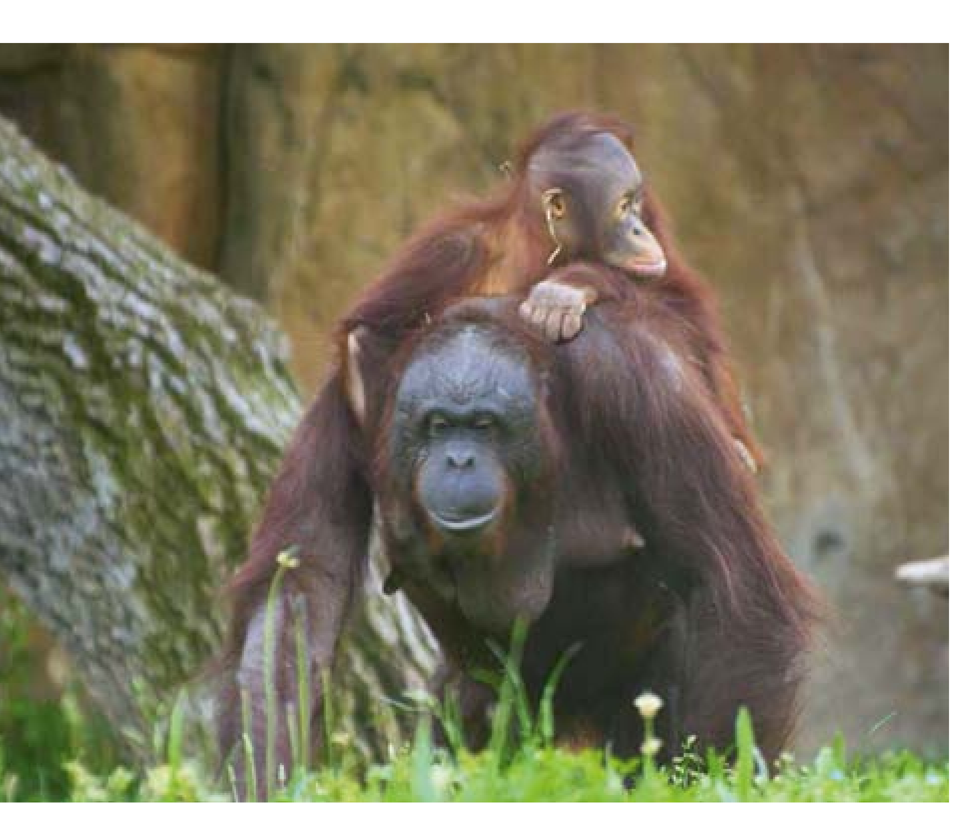
Dentro de las especies que comparten la crianza existen distintos grados de cooperación. Las conductas van desde simples juegos y acicalamientos ocasionales hasta el transporte y el alimento diarios. En ciertos casos, los cuidadores alimentan a las crías, e incluso las amamantan, como sucede en algunas especies de langures (*Presbytis johnii*), capuchinos (*Cebus olivaceus*) y monos ardilla (*Saimiri boliviensis*).

Otras veces acarrean a las crías con un gran desgaste de energía, como se observa en numerosos calitrícidos (tities y tamarinos). Este grupo presenta un estilo de crianza muy singular. Las hembras suelen parir gemelos y estos, una vez destetados, son transportados y alimentados por machos adultos. Los estudios de Paul Garber, de la Universidad de Illinois, sobre *Sanguinus mystax* han demostrado el importante papel de estos en la supervivencia de los gemelos. Los cuidados aloparentales

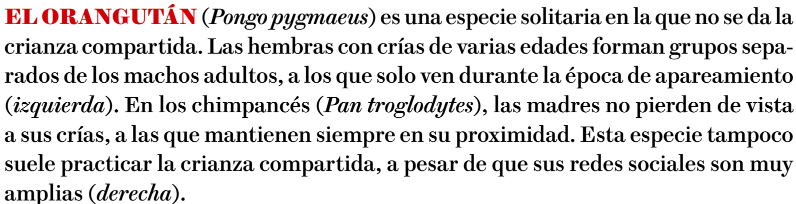


MODIFICADA A PARTIR DE «PRIMATE LIFE HISTORIES» POR C. ROSS, EN *EVOLUTIONARY ANTHROPOLOGY*, N.º 6, PÁGS. 54–63, 1998; THINKSTOCK/ERIC GEVAERT (*gorilas y tamarino*)

LA VELOCIDAD DE CRECIMIENTO es elevada en las crías de primates con altos índices de cuidados aloparentales, como en los tamarinos (entre ellos, el tamarino emperador, *Sanguinus imperator subgrisescens*, *derecha*). En estos animales, otros miembros del grupo distintos de la madre participan en más del 30 por ciento del tiempo total de crianza. En cambio, las crías de especies con bajos índices de cuidados compartidos (menos del 30 por ciento del tiempo de crianza), como las de los gorilas (*Gorilla gorilla*, *izquierda*), presentan un crecimiento más lento. (El eje de ordenadas muestra las diferencias en las tasas de crecimiento posnatal, o ganancia de peso diario desde el nacimiento hasta el destete, respecto al promedio primate: de ahí que algunas especies queden por encima de la media y otras, con valores negativos, por debajo; en los cálculos se ha tenido en cuenta el distinto tamaño corporal de cada especie.)







EL ORANGUTÁN (*Pongo pygmaeus*) **es una especie solitaria en la que no se da la crianza compartida. Las hembras con crías de varias edades forman grupos separados de los machos adultos, a los que solo ven durante la época de apareamiento** (*izquierda*). **En los chimpancés** (*Pan troglodytes*)**, las madres no pierden de vista a sus crías, a las que mantienen siempre en su proximidad. Esta especie tampoco suele practicar la crianza compartida, a pesar de que sus redes sociales son muy amplias** (*derecha*).



por adultos machos se observan también en otros géneros (Callitrichinae, Atelinae, Aotinae, Cercopithecinae, Hylobatinae, Hominidae), aunque con menor frecuencia. Se desconoce si el parentesco que comparten la cría y su cuidador es directo (hijos) o cercano (hermanos, nietos, primos, etcétera).

Hacerse cargo de la prole constituye sin duda una tarea delicada y dificultosa. Cabe preguntarse entonces por qué algunos miembros del grupo adoptan tal estrategia. Las observaciones denotan que, a menudo, los cuidadores son parientes próximos. De ahí que la hipótesis de la selección por parentesco, o el factor genético, represente una de las mejores explicaciones de la crianza cooperativa. Pero existen otras razones y explicaciones posibles sobre este comportamiento. Tal vez las hembras nulíparas (sin crías) practican para el momento de ser madres; o quizá los adultos jóvenes actúen así para incrementar las posibilidades de apareamiento en el futuro, al establecer alianzas con otros miembros, o para tener un mejor acceso a los recursos del grupo. Al parecer, existen numerosas motivaciones para practicar el altruismo y la reciprocidad.

SOCIEDADES HUMANAS ANCESTRALES

En el caso de los humanos, el manual de estilo de la crianza parece haber cambiado poco desde que surgió nuestra especie. Podemos comprobarlo al mirar bajo el prisma de un cazador-recolector de nuestros tiempos y, también, bajo el de los primeros humanos del Pleistoceno.

Las investigaciones de campo del siglo pasado nos dejaron un sinfín de datos etnográficos sobre la crianza de una riqueza incalculable. En los años sesenta y setenta del siglo pasado, los trabajos del antropólogo Richard B. Lee, de la Universidad de Toronto, y sus colaboradores sobre las tribus !kung y san del desierto del Kalahari en África revelaron los comportamientos de estos grupos bosquimanos. Las madres !kung acompañan a sus hijos hasta casi los tres o cuatro años, portándolos continuamente durante sus actividades diarias y durante la noche. En las duras condiciones desérticas, realizan también tareas de aprovisionamiento de alimentos y otros recursos a la comunidad. El acarreo constante facilita la alimentación del bebé, que lacta a demanda con tomas cada 13 minutos en promedio, casi como en otras especies de primates. Lo mismo sucede con la respuesta inmediata de las madres hacia sus hijos ante cualquier indicio de molestia o llanto.

Entre los pigmeos efé, de la República Democrática del Congo, el grado de cooperación es enorme. Los bebés son llevados y criados por múltiples cuidadores, bien por otras mujeres o por otros hombres del grupo. Aparte de la cuestión genética del parentesco, otra razón de peso empuja a ese comportamiento en esta etnia: su baja fertilidad. Las mujeres tienen en promedio 2,6 hijos, en comparación con los 5,4 hijos de otros grupos de cazadores-recolectores. Para garantizar la viabilidad de la población, todos los miembros del grupo colaboran en la crianza, bienestar y supervivencia de los menores. Aunque la mortalidad

infantil entre los grupos de cazadores-recolectores suele ser elevada, entre los efé resulta extremadamente baja. El colectivo se afana en reducir esas cifras, por su propia supervivencia.

Si retrocedemos al Pleistoceno, nos daremos cuenta de que sabemos muy poco de los estilos de crianza de las poblaciones fósiles. Podemos imaginarnos a los primeros humanos cuidando todos de todos, como se ha recreado en un sinfín de ilustraciones. Pero el mecanismo de este sistema social y cooperativo en nuestro linaje aún permanece borroso. Lo cierto es que la herencia primate nos ha acompañado siempre y, sobre esta base, hemos ido incorporando ingredientes hasta construir un sólido sistema social y biológico que nos ha garantizado una buena parte de nuestro éxito reproductivo como especie.

¿Cómo aproximarnos a los sistemas de crianza de nuestros ancestros? Varias estrategias pueden ofrecernos indicios valiosos, como buscar pistas arqueo-paleontológicas sobre el comportamiento de los primeros humanos, reconstruir sus modelos de fertilidad y fecundidad a partir de parámetros biológicos, así como plantear hipótesis sobre sus estructuras sociales o sobre la inversión energética de las madres en el crecimiento y desarrollo de sus hijos.

Una de las hipótesis más señaladas sobre la crianza compartida en nuestros ancestros fue planteada por la antropóloga Kristen Hawkes y sus colaboradores, de la Universidad de Utah, en los años noventa del siglo pasado. Se conoce como hipótesis de la abuela. Basándose en observaciones de grupos de cazadores-recolectores hadza en Tanzania, la investigadora planteó que las mujeres de edad avanzada, en su etapa infértil, desempeñaban un papel clave en la fertilidad de sus hijas al encargarse de proporcionar alimento a los nietos. Al poder destetar antes a sus hijos, las hembras volvían a entrar en el ciclo reproductivo más pronto, con lo que engendraban más hijos en intervalos más cortos.

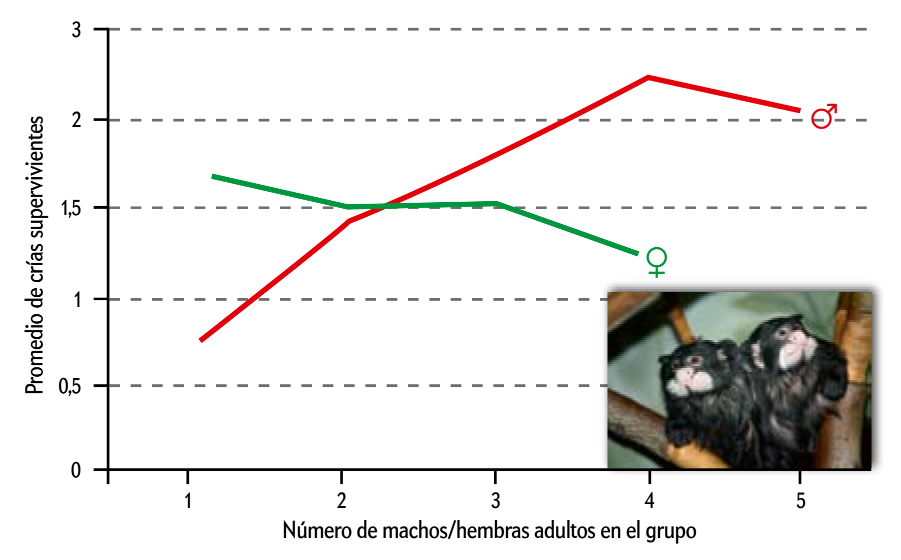
Desde el primer momento, la hipótesis fue objeto de debate y criticada por muchos expertos porque no se ajustaba bien al registro arqueo-paleontológico. Varios antropólogos se mostraron también disconformes, al argumentar que la esperanza de vida y la longevidad de especies humanas fósiles era difícil de precisar y no todas las hembras vivirían el tiempo suficiente como para llegar a ser abuelas. A pesar de las críticas, algunas reinterpretaciones recientes de la teoría con la ayuda de simulaciones matemáticas han traído de nuevo a la palestra científica la hipótesis de la abuela. Por otro lado, algunos estudios sobre grandes simios han revelado que chimpancés y gorilas también pueden vivir unos pocos años más allá de su etapa fértil, algo que hasta hace poco se negaba. Esta etapa postreproductiva, evidenciada en humanos y también en los grandes simios, podría darnos las claves de la longevidad de las especies [*véase* «El origen de la longevidad», por Rachel Caspari; Investigación y Ciencia, octubre de 2011].

En esta línea, se han abierto otros enfoques que permiten reflexionar sobre la crianza de nuestros ancestros. En concreto, los que se centran en el coste energético de ciertas etapas de la vida. Hace un par de años, nuestro grupo de investigación modeló el crecimiento en altura de los niños neandertales desde el nacimiento hasta los cinco años y observó un patrón más lento que en los niños de nuestra especie. Asimismo, en otro trabajo planteamos que los requerimientos energéticos de los neandertales resultaban también menores en esta etapa clave del desarrollo, cuando se produce el destete y el cambio de alimentación. Además de la menor demanda energética de las crías, puede que los cuidados compartidos de estos niños por otros miembros del grupo llevaran a los neandertales a reducir los intervalos de nacimientos, como sucedió en nuestra especie, según veremos a continuación. Algunos autores consideran que la lactancia finalizaba en torno a los 3,5 años de edad en los neandertales, ligeramente más tarde que en *Homo sapiens*, a los 2,5 años. De este modo, aunque un destete temprano pudo comprometer la salud de la cría, permitió también acortar el intervalo entre nacimientos y aumentar el número de descendientes.

LARGA INFANCIA, ENERGÍA A RAUDALES

Los bebés humanos son los más indefensos de todas las crías primates, maduran muy despacio y tienen una extrema dependencia de sus progenitores durante un largo período.

La prolongada infancia de los humanos ha dado lugar a cambios sociobiológicos relativos a los estilos de crianza, en la que se ha favorecido la cooperación de otros miembros del grupo. A ello también ha contribuido el hecho de que las crías humanas perdieran la capacidad de colgarse y asirse a las madres para transportarse con ellas y seguir su ritmo diario. Si hubiésemos mantenido esa habilidad durante nuestra prolongada dependencia materna, tal vez habríamos desarrollado otro estilo de crianza, no tan cooperativa, más semejante a la

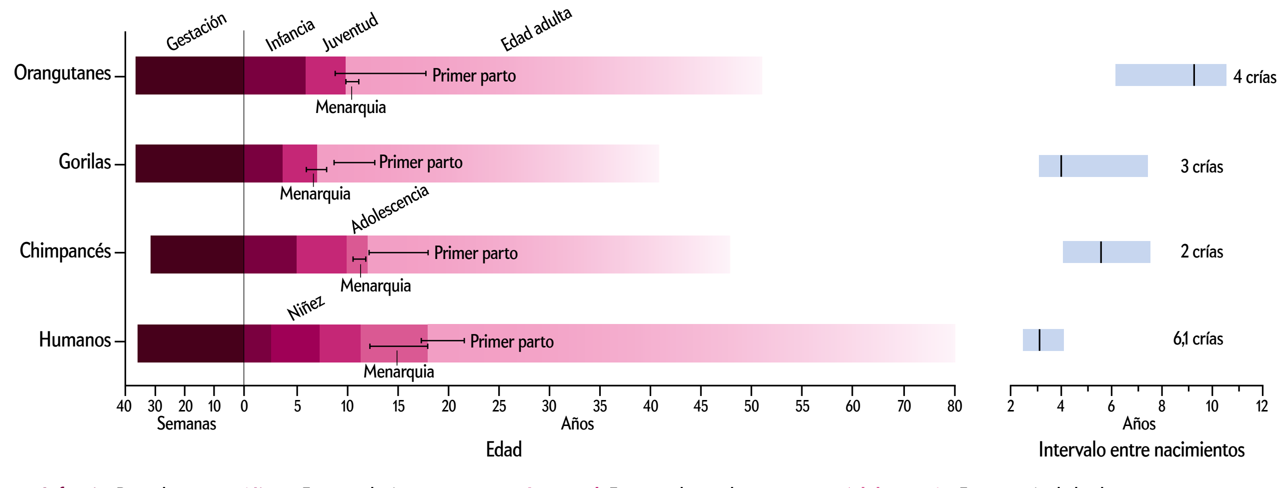


MACHOS ENTREGADOS A LA CRIANZA. **En numerosas especies de tamarinos, como el tití bigotudo (*Sanguinus mystax*), los machos del grupo se encargan del transporte y de la alimentación de las crías, una vez destetadas. El porcentaje de supervivencia de las crías es más elevado en los grupos con el mayor número de machos. Estos se articulan en torno a una hembra reproductora y se requiere la presencia de al menos dos para que el grupo sea viable. La hembra dominante y reproductora da a luz a gemelos dizigóticos con un elevado peso al nacer (entre un 15 y 20 por ciento del peso de la madre), por lo que resulta esencial la colaboración de los machos para el transporte de las crías y otros cuidados.**

DISTINTAS HISTORIAS DE VIDA

Cooperación: mayor fertilidad y mayores cerebros

Al comparar nuestra historia de vida con las de nuestros parientes primates más cercanos (los grandes simios como el orangután, el gorila y el chimpancé), se observa que nuestra especie presenta una infancia más corta (*izquierda*). A ello habría contribuido la colaboración de otros miembros del grupo en la crianza, un comportamiento que apenas exhiben las otras especies. El destete más temprano habría permitido a su vez un menor intervalo entre nacimientos (*derecha*; la línea negra representa el valor medio y el intervalo abarca los valores máximo y mínimo) y un mayor número de crías por hembra a lo largo de toda su vida fértil. Además, la ayuda externa habría favorecido el mayor desarrollo del cerebro humano y habría ofrecido una fuente de energía importante para mantener la prolongada infancia de los humanos.



▸ **Infancia:** Período marcado por la lactancia y la formación de los dientes de leche (dentición decidua).

▸ **Niñez:** Fase, exclusivamente humana, hasta la erupción del primer molar permanente. Se produce un cambio hacia una alimentación totalmente sólida.

▸ **Juventud:** Etapa en la que los dientes de leche dejan paso a los definitivos. Maduran los sistemas digestivo e inmunitario, hasta el completo desarrollo del organismo.

▸ **Adolescencia:** Fase propia de los humanos y, según algunos autores, también de los chimpancés. Se producen el estirón puberal y los cambios hormonales hasta el total desarrollo de los caracteres sexuales secundarios. En las niñas aparece la primera menstruación (menarquia).

que presentan hoy otras especies de primates muy cercanas a nosotros: los grandes simios (chimpancés, bonobos, gorilas y orangutanes). Estos rara vez dependen tan intensamente como los humanos de la ayuda de otros para cuidar a sus vástagos.

Uno de los factores que impulsó la colaboración habría sido el coste energético. Las demandas metabólicas para la madre son ingentes, una vez que el recién nacido continúa su crecimiento fuera del útero. Producir una leche materna adecuada a las necesidades fisiológicas del bebé es un reto metabólico importante para la madre, ya que el recién nacido se sitúa en un nivel trófico por encima de su progenitora e impone una fuerte demanda.

Ese requerimiento ya es elevado antes del nacimiento. La hipótesis energética de la gestación y del crecimiento, planteada por Holly Dunswoth, de la Universidad de Rhode Island, sugiere que la duración de la gestación en los humanos está limitada por el metabolismo materno y no tanto por el tamaño del canal pélvico (el conocido como dilema obstétrico) [*véase* «El difícil trance del parto humano», por Pat Shipman; Investigación y Ciencia, mayo de 2014]. De este modo, cuando la madre no puede destinar más energía al crecimiento fetal, tal restricción determina el inicio del parto. De acuerdo con este planteamiento, Karin Isler y Carel P. van Schaik, de la Universidad de Zúrich, han propuesto hace poco una nueva hipótesis energética que relaciona el tamaño cerebral y la crianza compartida en algunos mamíferos. Estudiaron estos parámetros en 445 especies de mamíferos (98 de ellos, primates). Según su idea, el crecimiento del voluminoso cerebro humano habría sido posible gracias a la inyección energética externa que recibieron la madre y el hijo de otros miembros no reproductivos del grupo. De hecho, en tiempo reciente se ha cuantificado el efecto de esta ayuda en las tasas de supervivencia del niño y de la fertilidad de la madre. La crianza compartida atenuó el estrés energético de las madres, lo que aceleró el crecimiento y maduración de las crías y redujo la mortalidad infantil; el destete más temprano contribuyó a su vez a acortar el intervalo entre nacimientos y a aumentar la tasa reproductora. Unas razones adaptativas y selectivas de mucho calado.

La cantidad de tiempo, energía y recursos que machos y hembras invierten en sus crías ha tenido importantes consecuencias en la evolución del comportamiento social de nuestra especie. La crianza cooperativa favorece la socialización y la mejora de las capacidades cognitivas para una buena interacción con otros miembros del grupo. Crea nuevas estructuras en las que los miembros muestran una gran tolerancia social y una intensa habilidad para crear vínculos, no solo en el ámbito de los cuidados, sino también en las acciones colectivas de defensa del territorio y del aprovisionamiento de recursos.

LA CRIANZA EN NUESTROS DÍAS

Si apartamos la vista del modo de vida ancestral y retornamos a nuestros entornos urbanos, contemplamos una imagen bastante diferente a la de nuestro pasado. El *Homo sapiens* de hoy se halla inmerso en unos ritmos diarios frenéticos y sigue

JESÚS RODRÍGUEZ; MODIFICADA A PARTIR DE «COOPERATIVE BREEDING AND ITS SIGNIFICANCE TO THE DEMOGRAPHIC SUCCESS OF HUMANS» POR K. L. KRAMER, EN *ANNUAL REVIEW ANTHROPOLOGY*, VOL. 39, PÁGS. 417-436, 2010

un estilo de vida a veces poco acorde con su diseño evolutivo y en el que la crianza se halla condicionada por la situación económica, laboral, social y cultural. Ahora bien, primates nunca hemos dejado de ser y, por esa razón, conservamos la esencia atávica de muchos millones de años de evolución y supervivencia en el planeta.

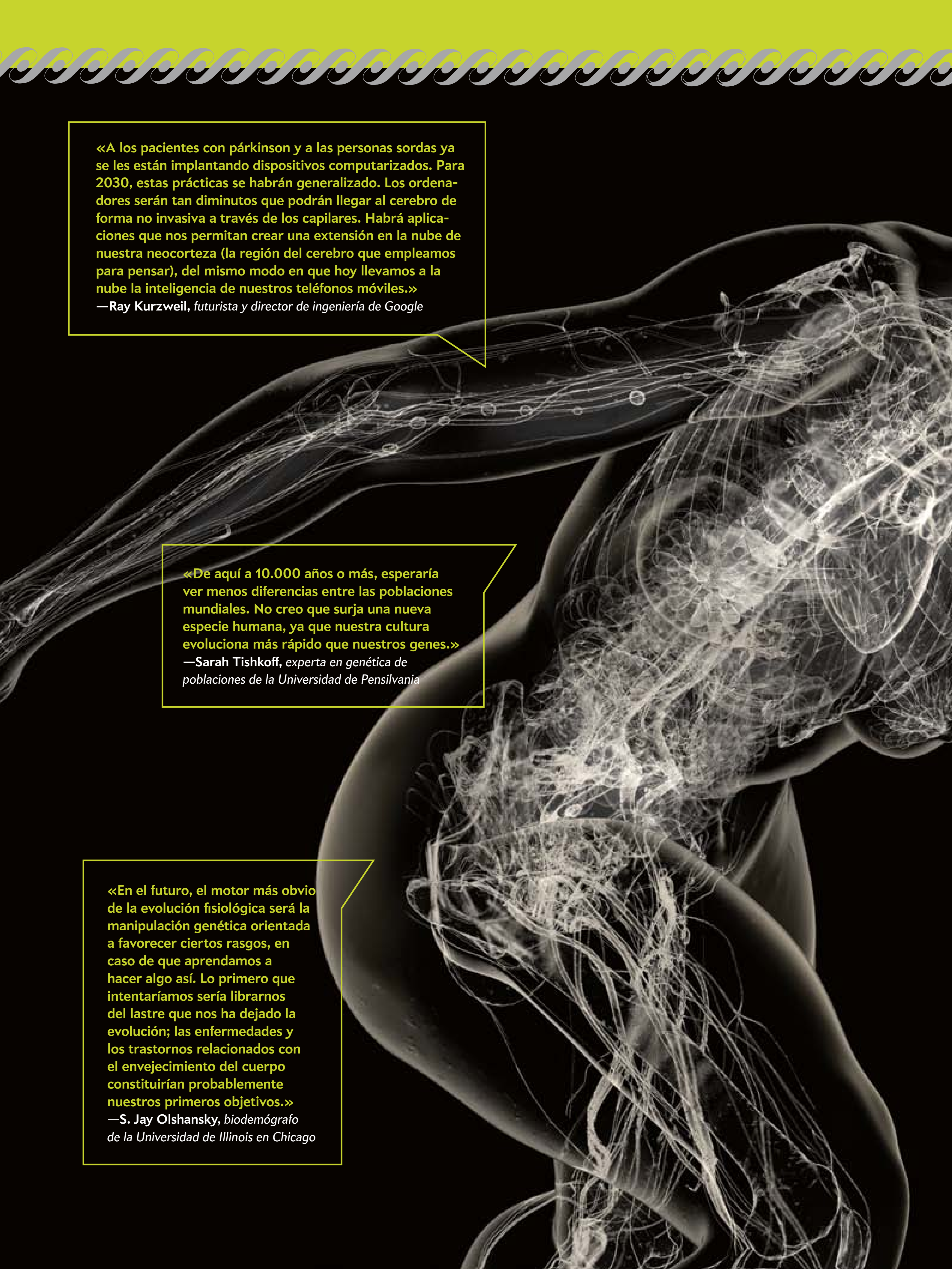
Es cierto que el estilo de crianza tradicional se ha ido diluyendo en las zonas más desarrolladas e industrializadas del planeta y, de hecho, durante muchos años algunos comportamientos (como la lactancia a demanda) dejaron de ser indicados por algunos expertos e instituciones. Afortunadamente, las perspectivas han cambiado y lentamente van mejorando, sobre todo en lo referente a las recomendaciones supranacionales de organismos como la OMS o la FAO respecto a la lactancia materna, la crianza y la salud reproductiva femenina. Estos consejos se centran en programas de apoyo a la salud de la mujer durante el embarazo, cuidados prenatales y preparación para un parto no excesivamente medicalizado; también promueven el contacto directo con el recién nacido y un período de lactancia exclusiva a demanda, al menos, durante los seis primeros meses de vida.

En cuanto a la ayuda de otras personas en la crianza, en nuestras sociedades se ha impuesto un modelo de crianza compartida con otros cuidadores con los que no existe ni parentesco ni vínculos sociales. Enviar a una cría a ser cuidada por extraños, con frecuencia pagando los servicios prestados a colectivos profesionales e instituciones, es un comportamiento del que no existe precedente entre otras sociedades humanas no industrializadas ni, por supuesto, entre otros primates. Este tipo de crianza es una aportación humana al acervo cultural que nos acompaña como especie. El devenir de estos sistemas y estilos de crianza se insertará en el bagaje que dejamos para las generaciones venideras. El tiempo y el futuro de la evolución irán haciendo su pausada labor para fijar o no estos comportamientos. La adaptación a la industrialización, en un sentido muy amplio, ha modificado las reglas del estilo de la crianza humana que se derivan de nuestro pasado primate desde hace millones de años.

Los ingredientes ancestrales de la crianza se basaban en varios pilares básicos, como la alimentación (lactancia a demanda) y el soporte emocional y físico (garantizado por la continua presencia de la madre o cuidador). En la actualidad, los cuidadores pueden ajustar estos elementos a su antojo, según su entorno, circunstancias sociales, culturales y económicas. Sin duda, la cooperación, una conducta esencial en el entramado de nuestras peculiares redes sociales, sigue constituyendo una estrategia básica para la supervivencia de las crías y, en definitiva, de nuestra especie.

PARA SABER MÁS

Mother nature. Maternal instincts and how they shape the human species. S. B. Hrdy. Ballantine Books. Ramdom House. Nueva York, 1999.
Parenting for primates. H. J. Smith. Harvard University Press, 2005.
Hunter-gatherer childhoods. Evolutionary, developmental and cultural perspectives. Dirigido por B. S. Hewlett, M. E. Lamb. Aldine Transactions, 2007.
Mind the gap. Tracing the origins of human universals. Dirigido por P. M. Kappeler y J. B. Silk. Springer, 2010.
Allomaternal care, life history and brain size evolution in mammals. K. Isler y C. P. van Schaik en *Journal of Human Evolution*, vol. 63, n.º1, págs. 52-63, 2012.



«A los pacientes con párkinson y a las personas sordas ya se les están implantando dispositivos computarizados. Para 2030, estas prácticas se habrán generalizado. Los ordenadores serán tan diminutos que podrán llegar al cerebro de forma no invasiva a través de los capilares. Habrá aplicaciones que nos permitan crear una extensión en la nube de nuestra neocorteza (la región del cerebro que empleamos para pensar), del mismo modo en que hoy llevamos a la nube la inteligencia de nuestros teléfonos móviles.»
—**Ray Kurzweil,** *futurista y director de ingeniería de Google*

«De aquí a 10.000 años o más, esperaría ver menos diferencias entre las poblaciones mundiales. No creo que surja una nueva especie humana, ya que nuestra cultura evoluciona más rápido que nuestros genes.»
—**Sarah Tishkoff,** *experta en genética de poblaciones de la Universidad de Pensilvania*

«En el futuro, el motor más obvio de la evolución fisiológica será la manipulación genética orientada a favorecer ciertos rasgos, en caso de que aprendamos a hacer algo así. Lo primero que intentaríamos sería librarnos del lastre que nos ha dejado la evolución; las enfermedades y los trastornos relacionados con el envejecimiento del cuerpo constituirían probablemente nuestros primeros objetivos.»
—**S. Jay Olshansky,** *biodemógrafo de la Universidad de Illinois en Chicago*



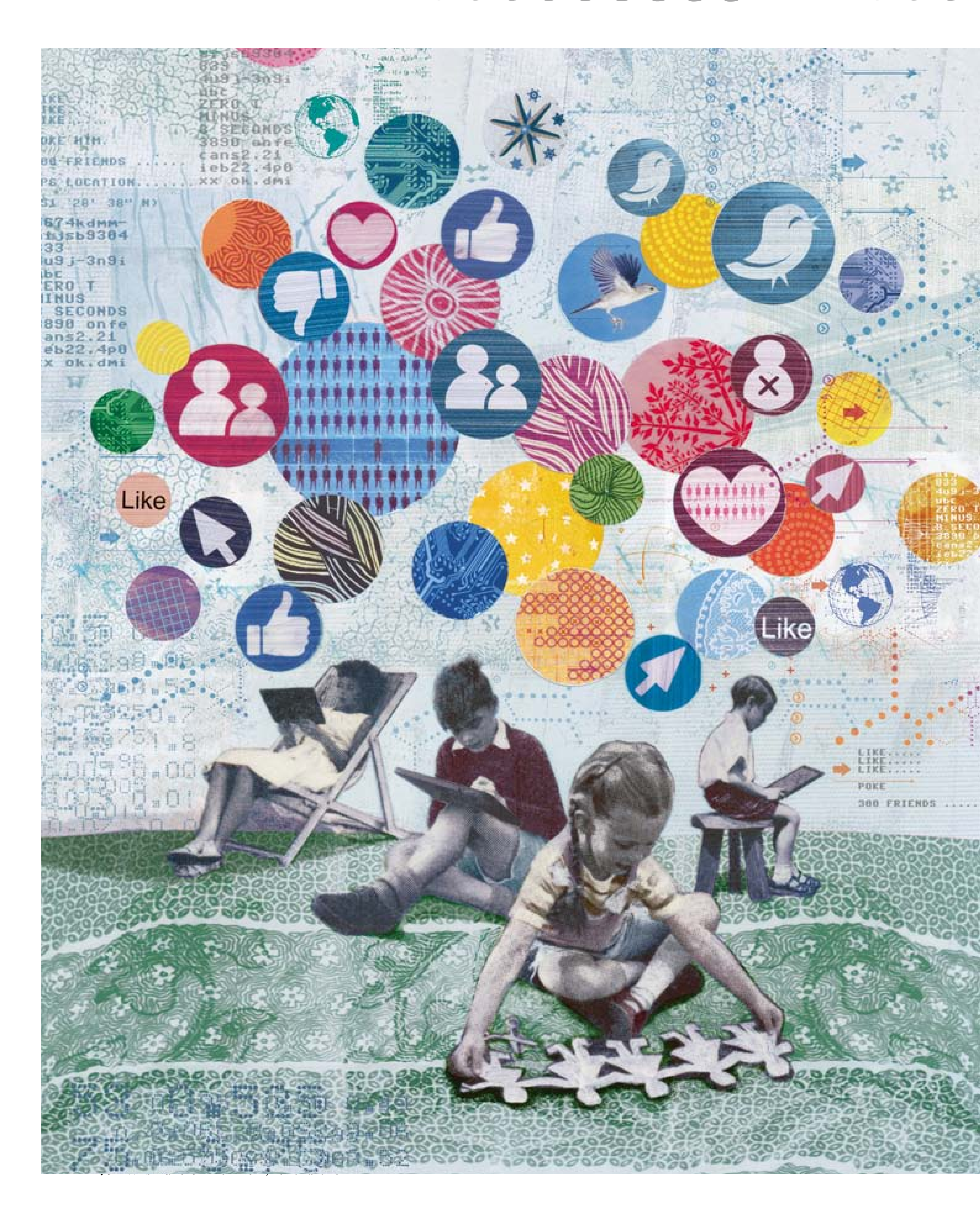
3

ADÓNDE NOS DIRIGIMOS

HEMOS PREGUNTADO a varios expertos cómo creen que evolucionará el ser humano en el futuro. Estas son sus opiniones.

«La evolución es incesante. Los humanos, como cualquier otra forma de vida sobre la Tierra, estamos evolucionando y continuaremos haciéndolo. Sin embargo, nadie sabe qué nos espera, salvo quizá la extinción. La evolución dispone de caminos propios que nadie puede predecir con certeza.»
—Yohannes Haile-Selasie, *paleoantropólogo del Museo de Historia Natural de Cleveland*

BRYAN CHRISTIE (*ilustración*), INFORMACIÓN DE KEVIN SCHULTZ

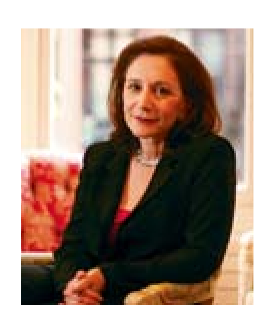

ZERO T
MINUS
8 SECONDS
3890 anfe
cans2.2i
ieb22.4p0
xx ok.dmi
Like
Like
LIKE.....
LIKE.....
LIKE.....
POKE
300 FRIENDS

EL PRIMATE INTERCONECTADO

Por primera vez en la historia de nuestra especie nunca estamos solos ni aburridos. ¿Hemos perdido algo fundamental acerca de nuestra humanidad? Sherry Turkle, socióloga del Instituto de Tecnología de Massachusetts, opina que permanecer siempre conectados está mermando nuestras capacidades sociales

Mark Fischetti

ERIK JACOBS, REDUX PICTURES (*Turkle*); MARTIN O'NEILL (*ilustración*)



Si usted tiene un teléfono inteligente, una página de Facebook y una cuenta en Twitter, es muy probable que alguna vez haya acabado por ignorar a un amigo o familiar que se encontraba en la misma sala a causa de toda esa tecnología social. Gracias a ella nunca estamos solos ni aburridos. Sin embargo, puede hacer que prestemos menos atención a nuestros allegados e incluso que nos resulte más difícil estar con nosotros mismos.

A muchos nos da miedo admitirlo. «Aún nos encontramos en una fase de romance con estas tecnologías», explica Sherry Turkle, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. «Somos como jóvenes enamorados, temerosos de estropearlo todo si hablamos de ello.»

Turkle ha entrevistado a cientos de personas de todas las edades acerca de cómo interaccionan con sus teléfonos inteligentes, tabletas, redes sociales, avatares y robots. Cree que, a diferencia de otras innovaciones rompedoras previas, como la prensa escrita o la televisión, los dispositivos del tipo «siempre encendido, siempre contigo» amenazan con socavar algunas de las facultades humanas básicas que necesitamos para desarrollarnos. Turkle expresa en esta entrevista sus preocupaciones, pero también un cauto optimismo acerca de la capacidad de los más jóvenes para resolver el problema.

¿Qué le interesa más sobre nuestra constante interacción con la tecnología social?
Uno de los principales cambios que observo es la poca tolerancia a estar solos. Parte de mi trabajo de campo tiene lugar en señales de *stop* o en la cola de los supermercados. En cuanto la gente tiene un segundo libre, ya está ocupada con su teléfono móvil. Absolutamente toda la investigación al respecto indica que la capacidad de las personas para estar a solas está desapareciendo. Y lo que puede ocurrir es que perdamos los momentos para soñar despiertos o para la introspección. En su lugar, miramos hacia fuera.

¿Afecta eso a individuos de todas las edades?
Sí. Pero los niños, sobre todo, necesitan soledad. La soledad constituye una condición previa para aprender a conversar con nosotros mismos. Esa capacidad para estar a solas y descubrirse a uno mismo constituye la base del desarrollo. Pero ahora, desde muy jóvenes —incluso a los dos, tres, o cuatro años—, a los niños se les da acceso a una tecnología que reemplaza la soledad por distracciones externas. Irónicamente, eso dificulta establecer relaciones verdaderas.

Puede que la gente no quiera aburrirse.
Muchas personas afirman no necesitar momentos de calma. Tan pronto como eso ocurre, sacan el teléfono; se inquietan. No han aprendido a entablar conversaciones o relaciones, las cuales implican momentos de calma.

Entonces, ¿valoramos menos las relaciones?
La gente empieza a ver a otros individuos, hasta cierto punto, como objetos. Imagine a dos personas en una cita y que una le diga a la otra: «Tengo una idea. En vez de mirarnos las caras, ¿por qué no nos ponemos las gafas de Google? Así, si la cosa se pone aburrida, podré echar un vistazo al correo electrónico sin que te des cuenta». Eso afecta también a la familia. Cuando la tía pesada empieza a hablar en la cena, su sobrinita saca el teléfono y se conecta a Facebook. En un instante, su mundo se llena de guerras de bolas de nieve y de bailarinas. Y adiós a la cena. La cena representaba el ideal utópico de la familia estadounidense en todo encuentro que reuniese a tres generaciones. Hoy la utopía es Facebook.

¿Y quienes se llevan el teléfono a la cama? ¿Por qué iban a sentirse solos si están durmiendo?
He preguntado a bastantes escolares de primaria y secundaria si responden a los mensajes durante la noche. «¡Sí, claro!», responden. Es un estilo de vida que llamo «comparto, luego existo».

Quien comparte mensajes y está dispuesto a recibirlos en mitad de la noche ha cambiado de zona horaria. Y todas esas personas se sienten en la obligación de responder. La expectativa es el acceso permanente. Todos están listos para llamar con la aquiescencia de sus iguales. Estoy haciendo un estudio del caso de una chica que cuenta con 2000 seguidores en Instagram. Hace una pregunta a las nueve de la noche y, a las dos de la madrugada, ya está recibiendo respuestas. Y permanece despierta para recibirlas. Así son las dos de la madrugada para muchos niños.

¿Qué le espera a alguien que vive de esa manera?
Si no se le pone freno, creo que impide desarrollar por completo un sentido de autonomía personal. Alguien que no se ve competente para manejar por sí solo cuestiones importantes no será capaz de mantener relaciones personales o de negocios. Si al final sometemos todo a votación, acabaremos teniendo problemas.

La vida se convierte en un proyecto colaborativo.
Convertimos en proyectos colaborativos decisiones importantes. Sin embargo, tal vez llegue un momento en que a una persona con responsabilidades —no en la veintena, sino tal vez en la treintena— eso le empiece a incomodar y acabe desarrollando capacidades emocionales en las que nunca se había puesto a trabajar en serio.

¿Qué opina de la interacción con robots y personalidades automatizadas?
En los años setenta, la gente sostenía que, aunque el pensamiento simulado pudiera considerarse pensamiento, los sentimientos simulados no eran sentimientos. El amor simulado nunca fue amor. Esto ya no se ve así. A quienes entrevisto me dicen que si Siri [la voz del iPhone] les engañara un poco mejor, estarían encantados de hablar con ella.

¿No es como en la película *Her*?
Exactamente. La postura actual parece ser tal que, si un robot pudiera hacernos creer que nos entiende, no nos importaría tenerlo como acompañante. Se trata de una evolución notable en cuanto a lo que pedimos en nuestras interacciones, incluso en lo que se refiere a cuestiones íntimas. Lo veo en niños y en adultos. Los nuevos robots están diseñados para hacernos sentir comprendidos. Aun así, nadie finge creer que nos entienden.

¿Qué línea se cruza con eso? ¿La falta de empatía?
No hay un intercambio auténtico. Hemos pasado a admitir que la empatía no resulta importante para sentirse comprendido. Una de las mujeres a las que entrevisté me dijo que no le molestaría tener un novio robot. Quiere uno de esos modernos robots japoneses. Le dije: «Sabes que no te comprende». Ella me contestó que lo único que quería era un poco de urbanidad en la casa: «Me basta con algo que me sirva para no sentirme sola».

Hay quienes aceptan tales robots como posibles acompañantes para personas mayores. Pero aquí me permitiré emitir un juicio moral: creo que los ancianos se merecen poder contar su vida a alguien que entienda lo que es la vida. Han perdido cónyuges; han perdido hijos. Estamos sugiriendo que se lo cuenten a algo que no sabe qué es la vida ni qué significa perder a alguien.

Resulta fundamental entender que este cambio en la manera de interaccionar no constituye un asunto exclusivamente tecnológico. Tiene que ver con la manera en que estamos evolucionando cuando nos enfrentamos a algo pasivo. Espero que prestemos más atención a esa inclinación a proyectar humanidad sobre un robot y a aceptar la apariencia de empatía como algo real, porque creo que nos lleva a un callejón sin salida. ¿De verdad vamos a pedirle más a la tecnología y menos a nuestros congéneres?

¿Plantean el mismo problema los avatares y la realidad virtual?
En tales casos, pasamos de la vida real a una mezcla de vida real y virtual. Un joven me lo explicó de manera muy concisa: «La vida real no es más que una ventana. Y no es necesariamente la mejor de todas las que tengo». La gente olvidó la realidad virtual durante un tiempo, pero ahora ha regresado con la adquisición de Oculus por Facebook: la fantasía de Mark Zuckerberg de poder quedar con nuestros amigos en un mundo virtual donde todos nos parecemos a Angelina Jolie y Brad Pitt, vivimos en una casa magnífica y solo mostramos lo que queremos mostrar. Estamos evolucionando hacia una manera de pensar en la que eso conforma una utopía.

Los escépticos sostienen que un avatar no se diferencia de nuestro yo real.
Es cierto que actuamos todo el tiempo. Ahora mismo, yo estoy intentando parecer la mejor Sherry Turkle. Pero no es exactamente igual que estar en mi casa en pijama. En el caso de Facebook o de un avatar, la diferencia radica en que podemos editar. Una mujer publica una foto suya y después retoca el color, el fondo y la luz. ¿Por qué? Porque la quiere de cierta manera. Nunca antes habíamos podido hacerlo, y eso nos fascina.

Una vez pregunté a un chico de 18 años qué problema veía en la conversación. «Que es en tiempo real. No puedes controlar lo que vas a decir», me contestó. Se trata de una respuesta profunda. Y es la misma razón por la que mucha gente prefiere el correo electrónico: no solo por una cuestión de manejar los tiempos, sino porque básicamente nos permite hacerlo bien.

Una de las razones del progreso de la humanidad se debe a que funcionamos en grupo y eso proporciona a cada individuo más oportunidades de éxito. ¿La progresión hacia una vida en línea menoscaba esta ventaja?
Esa es justo la cuestión a la que nos enfrentamos. ¿Estamos socavando nuestra ventaja competitiva o la estamos mejorando? Buena parte de mis colegas opinan lo segundo. Internet nos proporciona nuevas formas de estar juntos y de formar alianzas. Pero creo que nos encontramos en un punto de inflexión. Mientras lo virtual nos deslumbraba, hemos dejado de lado la vida real. Hemos de encontrar el equilibrio entre lo cautivador de lo virtual y la realidad de nuestro cuerpo y de este planeta. Resulta muy fácil mirar para otro lado. ¿Estamos dispuestos a salir ahí fuera y trabajar para que nuestras comunidades reales sean como deberían?

Sus críticos arguyen que no hay de qué preocuparse, pues esta relación con la tecnología no es algo nuevo. Lo mismo ocurrió con la televisión. Ya sabe: el televisor está ahí para cuidar de sus hijos, así que usted ya no tiene por qué hacerlo.
En primer lugar, la televisión puede convertirse en una experiencia de grupo. Yo me crié en una familia en la que nos sentábamos frente al televisor, nos peleábamos por la programación y la comentábamos juntos. Pero cuando cada uno mira un programa distinto encerrado en su habitación, por así decirlo, eso se termina. Hablamos de tecnología que siempre está encendida y que siempre está contigo: eso representa un salto enorme. Estoy de acuerdo en que ha habido otros saltos gigantescos, como el que trajo el libro. Sin embargo, la diferencia que introduce el «siempre encendido» radica en que, en la práctica, no nos deja alternativas.

¿Quiere decir que antes podíamos apagar la televisión y seguir con nuestras ocupaciones?
No puedo vivir mi vida profesional ni personal sin el teléfono o el correo electrónico. Mis alumnos ni siquiera pueden recibir el programa de clase sin él. La opción de quedarnos fuera no existe. La cuestión es: ¿cómo vamos a llevar una vida más plena con algo que siempre está encendido y que siempre tenemos encima? Y espere a llevarlo en la oreja, la chaqueta o las gafas.

¿Cómo alcanzar una solución?
Llegará en forma de nuevos hábitos. Creo que las empresas tomarán parte en el proceso cuando se den cuenta de que no es positivo que la gente viva permanentemente conectada. Surgirán nuevas normas sociales. Hoy, si recibo un mensaje y no contesto en veinticuatro horas, se preocupan por mí o se enfadan conmigo porque no he respondido. ¿Por qué? Creo que, en lo tocante a estar siempre accesibles, nuestras expectativas cambiarán.

¿Alguna sugerencia acerca de por dónde empezar?
Creo que debería haber espacios sagrados: la cena con la familia, el coche... Tendríamos que reservar esos momentos para la conversación, ya que en ella se encuentra el antídoto a buena parte de los problemas que estoy describiendo. Hablar con los hijos, la familia o nuestra comunidad ayuda a que los efectos negativos no se manifiesten tanto.

¿Deberíamos hablar más sobre la tecnología?
Mi mensaje no es antitecnológico. Es a favor de la conversación y el espíritu humano. Intento cuestionar la cultura dominante del «más, mejor y más rápido». Hemos de reivindicar lo que necesitamos para pensar por nosotros mismos, para nuestro desarrollo y para relacionarnos con nuestros hijos, la colectividad y la pareja. En cuanto a los robots, espero que la gente entienda que con quien realmente estamos decepcionados es con nosotros mismos. Eso me resulta muy triste. Supone reconocer que no nos ofrecemos conversación ni compañía los unos a los otros. No hay otra razón para hablar con un robot del que sabemos que no entiende ni una palabra de lo que decimos. Nos estamos defraudando unos a otros. No tiene nada que ver con los robots, sino con nosotros mismos.

¿Quién parará este tren al que nos hemos subido?
Lo que me da esperanzas es ver a gente joven que ha crecido con toda esta tecnología pero que no vive enamorada de ella. Chicos que han visto cómo empobrece su vida en la escuela y en su casa, y que se ven capaces de decir: «Para un momento». Eso me hace sentir moderadamente optimista.

Tengo multitud de casos de niños que, si están hablando con sus padres, surge un tema de conversación y el progenitor va a buscarlo a Internet, le dirán: «Papá, deja de mirar en Google. Solo quiero hablar contigo». Cuando voy al parque, veo a niños que llaman a su madre desde lo alto del tobogán y esta les ignora. Con cinco, ocho o nueve años, simplemente se oponen. Pero, al llegar a los trece, catorce o quince, comienzan a reflexionar al respecto. Y, cuando los entrevisto, me dicen que ellos no van a criar a sus hijos del mismo modo. Que pondrán reglas, como prohibir el teléfono durante la cena.

También veo indicios de que toda esta tecnología les crea la sensación de estar trabajando: la idea de tener que actualizar constantemente el perfil de Facebook. Creo que hay muchas posibilidades de que los niños se nos adelanten. Ven el precio que han de pagar y piensan: «No tengo por qué dejar de usar esta tecnología, pero tal vez pueda emplearla de un modo más inteligente».

Mark Fischetti *es redactor de* Scientific American.

PARA SABER MÁS

Alone together: Why we expect more from technology and less from each other. Sherry Turkle. Basic Books, 2001.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Está Google cambiando nuestra mente? Daniel M. Wegner y Adrian F. Ward en *IyC*, enero de 2014.

El futuro de la evolución humana

Durante los últimos 30.000 años nuestra especie ha experimentado cambios notables y rápidos, un proceso que todavía continúa

John Hawks

EN SÍNTESIS

Algunos investigadores y comunicadores científicos han proclamado que nuestra especie ya no está sometida a la selección natural y que nuestra evolución ha cesado.

En realidad, los humanos hemos evolucionado con rapidez y de forma notable en los últimos 30.000 años. El pelo lacio y negro, los ojos azules y la tolerancia a la lactosa son ejemplos de rasgos relativamente recientes.

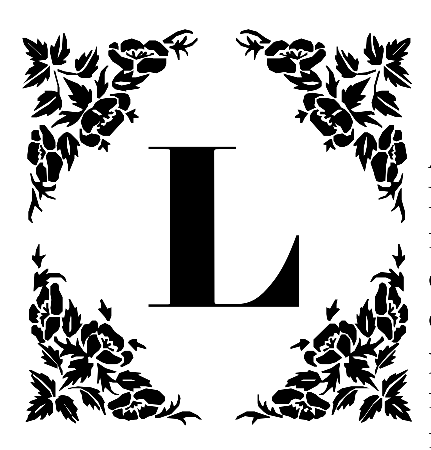
Esta evolución acelerada ha sido posible por varios motivos, como la transición de las sociedades de cazadores-recolectores hacia las agrarias, que permitió un crecimiento rápido de la población. Cuanto más aumenta esta, más probable es que surjan nuevas mutaciones ventajosas.

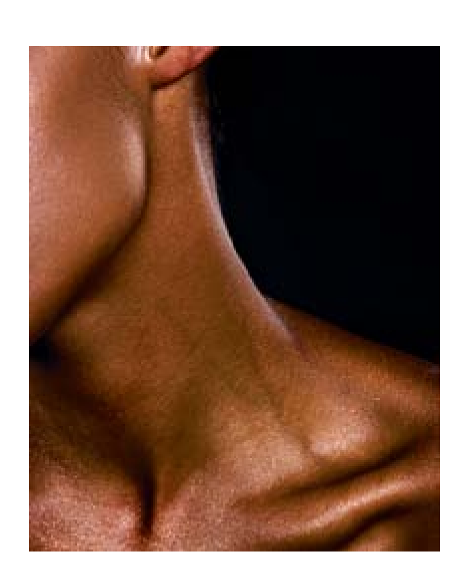
Los humanos, sin duda, seguiremos evolucionando en el futuro. Aunque parezca que nos encaminamos hacia una mezcla cosmopolita de genes, las generaciones venideras seguramente serán un vistoso mosaico de nuestro pasado evolutivo.



John Hawks es antropólogo y experto en evolución humana de la Universidad de Wisconsin-Madison.







L A ESPECIE HUMANA ES TENAZ. Ningún otro ser vivo del planeta ha logrado ser amo de su destino como nosotros. Hemos conjurado infinidad de peligros por cuya causa perecimos como moscas y hemos aprendido a resguardarnos de los elementos y de los depredadores; hemos ideado curas y tratamientos para multitud de enfermedades mortales y transformado los pequeños huertos de nuestros ancestros en vastos campos agrícolas mecanizados; y hoy criamos hijos sanos como nunca antes, pese a las adversidades de siempre.

Muchas personas aducen que nuestra ventaja técnica (la capacidad para desafiar y controlar las fuerzas de la naturaleza) nos ha liberado de la selección natural y que la evolución humana ha cesado. Según este argumento, ya no existe la «supervivencia del más apto» porque todos llegamos a viejos. Esta noción desacertada no solo se halla en la mente del gran público. Investigadores como Steven Jones, del Colegio Universitario de Londres, y prestigiosos comunicadores científicos, como David Attenborough, también han declarado que la evolución humana ha llegado a su fin.

Pero tal idea resulta falsa. En el pasado reciente sí hemos evolucionado, y seguiremos haciéndolo mientras vivamos. Si tomamos los más de siete millones de años que han transcurrido desde que los humanos nos separamos del último ancestro común con los chimpancés y los condensamos en un día de 24 horas, veremos que los últimos 30.000 años apenas suponen seis minutos. Pero el último capítulo de la evolución humana está repleto de andanzas: enormes migraciones a nuevos entornos, profundos cambios en la alimentación y aumento de la población mundial en más de mil veces. Todas esas personas han aportado numerosas mutaciones singulares al conjunto de la población, lo que ha imprimido un rápido impulso a la selección natural. La evolución humana no se ha detenido; si acaso, se está acelerando.

UN LEGADO ANTROPOLÓGICO

Desde hace tiempo, el estudio de los restos óseos de antiguos pobladores nos indica que algunos de nuestros rasgos son recientes y aparecieron con suma rapidez. Hace unos 11.000 años, a medida que la caza y la recolección dieron paso a la agricultura y a la cocción de alimentos, la anatomía humana cambió. Los habitantes de Eurasia y del norte de África de ese tiempo poseían una dentadura un diez por ciento mayor que los de hoy en día. El consumo de alimentos cocinados, más blandos, redujo el esfuerzo de la masticación, y los dientes y la mandíbula se contrajeron paulatinamente con el paso de las generaciones.

Los antropólogos conocen estos atributos desde hace decenios, pero solo en los últimos diez años se ha puesto de relieve cuán novedosos son. El estudio del genoma humano nos ha revelado los últimos objetivos de la selección. Se ha visto así que los descendientes de los agricultores tienden a producir una mayor cantidad de amilasa salival, una enzima clave para degradar el almidón de los alimentos. La mayoría de las personas poseemos varias copias del gen que codifica la amilasa, el *AMY1*. En cambio, los cazadores-recolectores actuales, como los datoga de Tanzania, suelen tener menos copias que los sucesores de las poblaciones agrarias, ya vivan en África, Asia o América. Ese cambio en el metabolismo del almidón desde el inicio del proceso pudo aportar una ventaja a los antiguos agricultores cuando comenzaron a ingerir granos ricos en almidón.

Otra adaptación alimentaria, la tolerancia a la lactosa, constituye uno de los ejemplos mejor estudiados de la evolución humana reciente. Casi todos nacemos con la capacidad para sintetizar la enzima lactasa, que descompone la lactosa (el azúcar de la leche) y facilita la obtención de energía a partir del líquido nutricio, algo esencial para la vida del lactante. La mayoría de las personas perdemos esa facultad en la edad adulta. Pero a lo largo de nuestro pasado evolutivo reciente, desde que comenzamos a consumir leche de animales, han aparecido como mínimo cinco mutaciones que alargan la actividad del gen de la lactasa. Tres de ellas se originaron en diferentes regiones del África subsahariana, donde el pastoreo se practica desde tiempos remotos. La cuarta resulta habitual en Arabia y parece haber surgido en las antiguas tribus de pastores de cabras y dromedarios.

La quinta mutación, la mayoritaria, mantiene activado el gen de la lactasa en la edad adulta. Hoy se presenta en las pobla-

JOSEPH CLARK, GETTY IMAGES



NUMEROSOS RASGOS de la biología humana son relativamente nuevos. Los ojos azules, el cabello lacio, espeso y negro, la capacidad para digerir la leche en la edad adulta y ciertas mutaciones que aclaran el color de la piel han surgido en los últimos 30.000 años.



ciones que ocupan desde Irlanda hasta India, con la frecuencia más alta en Europa septentrional. La mutación se originó en un individuo hace 7500 años (milenio arriba o abajo). En 2011 se analizó el ADN recuperado de Ötzi, el «hombre del hielo», quien quedó momificado de forma natural hace unos 5500 años en el norte de Italia. Carecía de la mutación de tolerancia a la lactosa, un indicio de que todavía no era común en esa región miles de años después de haber aparecido. Desde entonces, se ha secuenciado el ADN de esqueletos de agricultores que vivieron en Europa hace más de 5000 años. Ninguno era portador de la mutación. Pero hoy, en la misma región se cuentan por cientos de millones los que la poseen y representa más del 75 por ciento del acervo génico. No se trata de una paradoja, sino de la progresión matemática de la selección natural. Las mutaciones nuevas sometidas a la selección crecen exponencialmente, pero deben transcurrir muchas generaciones antes de volverse frecuentes en la población. Ahora bien, una vez que lo consiguen, se diseminan con rapidez y acaban convirtiéndose en dominantes.

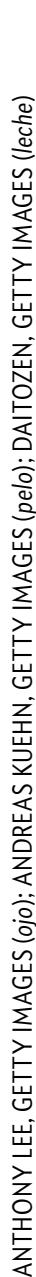
LA MODERNIDAD DE LAS RAZAS

Tal vez lo más extraordinario de nuestra evolución es que numerosos rasgos físicos de la anatomía humana resultan totalmente novedosos. El cabello negro, espeso y lacio de muchos orientales surgió en los últimos 30.000 años gracias a una mutación de *EDAR*, un gen esencial en el desarrollo inicial de la piel, el pelo, la dentadura y las uñas. La variante genética viajó con los primeros colonizadores del continente americano, cuyos pobladores de hoy comparten raíces comunes con los del oriente asiático.

De hecho, la historia evolutiva de la pigmentación de la piel, el pelo y el iris es sorprendentemente reciente. En las primeras fases de la evolución humana, todos nuestros antepasados tenían la piel, el cabello y los ojos oscuros. A partir de ese estado primigenio, docenas de cambios genéticos los fueron aclarando hasta cierto punto. Parte de ellos corresponden a antiguas variaciones presentes en África pero más comunes en otras regiones del globo; la mayoría, empero, son nuevas mutaciones surgidas aquí y allá. De este modo, un cambio en el gen *TYRP1* convierte en rubios a algunos isleños de las Salomón; la mutación de *HERC2* deriva en ojos azules; modificaciones en el *MC1R* hacen crecer pelo rojo en lugar de moreno; y la mutación del gen *SLC24A5*, que emblanquece la piel, se halla en hasta el 95 por ciento de los europeos. Como en el caso de la lactasa, el ADN antiguo está ofreciendo información sobre la antigüedad de tales mutaciones. Aunque los ojos azules surgieron aparentemente en individuos que vivieron hace más de 9000 años, el gen *SLC24A5* todavía no se había generalizado en la población, según se desprende del análisis del ADN de esqueletos datados en esa fecha. El color de la piel, el pelo y los ojos evolucionaron con una rapidez pasmosa.

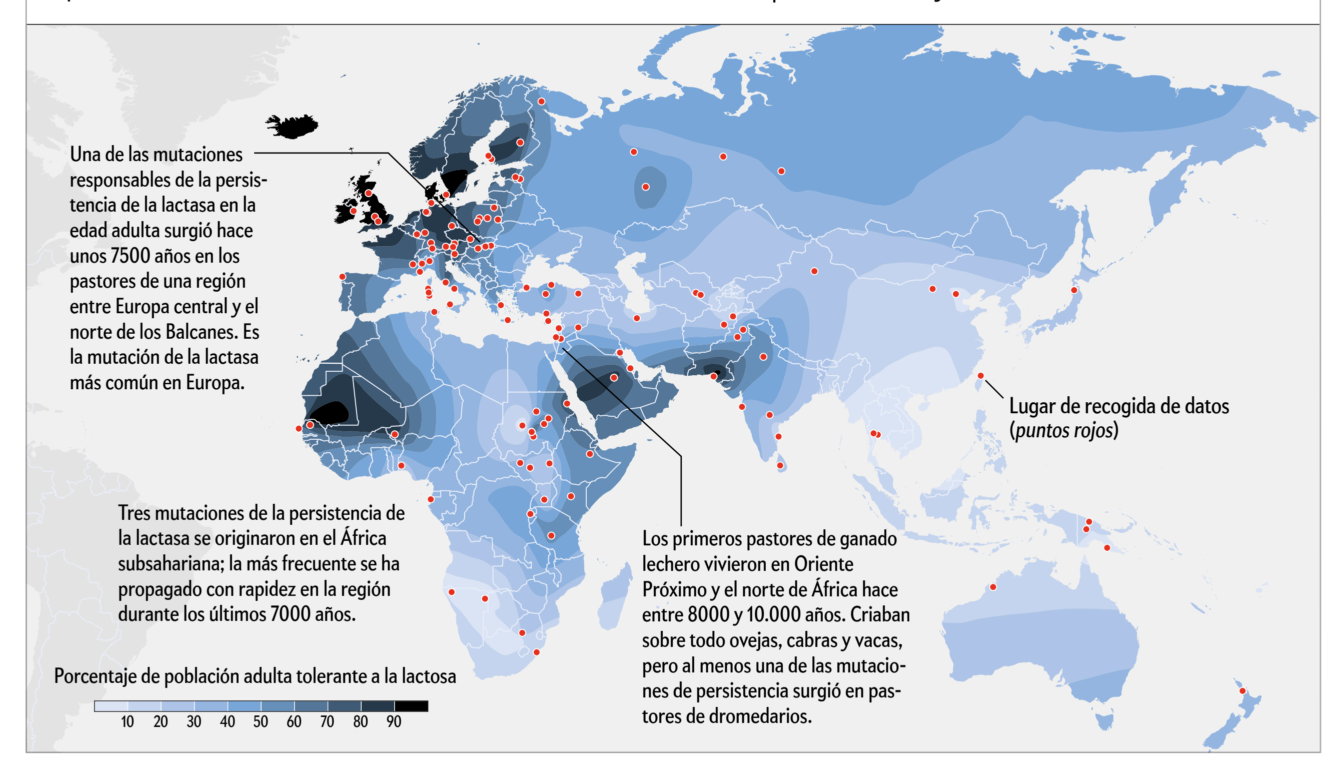
La tonalidad de la pigmentación constituye una de las diferencias raciales más obvias y, en cierta manera, la más fácil de estudiar. También se han investigado rasgos más extraños y ocultos de la anatomía humana. Pensemos por un momento en el cerumen del oído. Si bien en la mayoría de las personas suele ser pegajoso, muchos orientales segregan una cera seca y escamosa, nada pringosa. Los antropólogos conocen esta peculiaridad desde hace más de un siglo, pero los genetistas no han descubierto la causa hasta hace poco. El cerumen seco procede de una mutación relativamente nueva del gen *ABCC11*, que con apenas 20.000 o 30.000 años de antigüedad afecta también a las glándulas apocrinas que segregan el sudor. Una persona con mal olor de axilas y cerumen pegajoso probablemente presentará la versión original del *ABCC11*; si su cerumen es seco y no necesita mucho desodorante, seguramente poseerá la mutación.

Milenios antes de que el cerumen seco apareciera por primera vez en los pobladores de Asia oriental, otra mutación en apariencia sencilla comenzó a salvar la vida de millones de africanos amenazados por una enfermedad mortal. El gen *DARC* produce una proteína en la superficie de los glóbulos rojos que reduce el exceso de quimiocinas, un tipo de moléculas del sistema inmunitario que circulan en la sangre. Hace unos 45.000 años, una mutación de *DARC* confirió una notable resistencia contra *Plasmodium vivax*, uno de los dos principales parásitos causantes del paludismo. *P. vivax* penetra en los glóbulos rojos a través de la molécula DARC, por lo que es posible impedir su entrada



La mutación que permite digerir la leche

Gozar de los lácteos en la edad adulta es un privilegio bastante nuevo en nuestra historia evolutiva. El ser humano depende de la enzima lactasa para descomponer la lactosa, el azúcar de la leche, pero el organismo suele cesar de fabricar la lactasa al término de la adolescencia y la mayoría de la población adulta es intolerante a ese azúcar. En los últimos 10.000 años, varias poblaciones de pastores han desarrollado mutaciones genéticas que mantienen activa la lactasa durante toda la vida. Hasta ahora se han descubierto cinco mutaciones, pero quizás haya varias más. Todas esas adaptaciones explican la prevalencia de la tolerancia a la lactosa que se observa hoy en el mundo.



FUENTE: BASE DE DATOS DE LA ASOCIACIÓN MUNDIAL DE LA PERSISTENCIA DE LA LACTASA

silenciando la expresión del gen en cuestión. Pero por contra, la ausencia de DARC aumentó la cantidad de quimiocinas inflamatorias en la sangre, lo que a su vez se ha vinculado con el aumento de la incidencia de cáncer de próstata en los varones afroamericanos. No obstante, el éxito global de la mutación fue tal que el 95 por ciento de las personas que viven al sur del Sáhara la poseen, frente al escaso 5 por ciento de los habitantes de Europa y Asia.

EL PODER DEL AZAR

Solemos pensar que la evolución corresponde a un proceso en el que unos genes «beneficiosos» reemplazan a otros «perjudiciales», pero la fase más reciente de la adaptación humana ofrece pruebas claras de la importancia del azar en la evolución. Las mutaciones ventajosas no persisten de forma automática. Todo depende del momento y del tamaño de la población.

Aprendí esta lección del añorado antropólogo Frank Livingstone. El comienzo de mi formación coincidió con el final de su dilatada carrera, durante la cual investigó la base genética de la resistencia al paludismo. Hace más de 3000 años, en África e India surgió una mutación del gen de la hemoglobina, la molécula encargada de transportar el oxígeno en los glóbulos rojos. Cuando una persona hereda dos copias de la mutación, bautizada como hemoglobina S, sufre la anemia falciforme o drepanocítica, una enfermedad en la que los glóbulos se deforman y obstruyen los vasos sanguíneos. Los glóbulos normales son lo bastante blandos y flexibles para circular a través de los capilares minúsculos; en cambio, los mutantes son rígidos y puntiagudos, con una peculiar forma de hoz. Pero resulta que la distinta morfología frustra todo intento del parásito palúdico por infectarlos.

Otra mutación de la hemoglobina que interesó a Livingstone fue la hemoglobina E. Se trata de una molécula frecuente en el sudeste asiático que confiere menos resistencia contra el paludismo, pero que está exenta de las graves consecuencias de la hemoglobina S. En una clase un día le pregunté: «La hemoglobina E parece mucho mejor que la S. ¿Por qué entonces no existe en África?».

«Porque allí no apareció», me respondió Livingstone.

La respuesta me sorprendió. Suponía que la selección natural era el arma más poderosa del arsenal de la evolución. Los humanos han vivido con el temible parásito del paludismo durante miles de años en África. Por fuerza, la selección habría eliminado las mutaciones menos útiles y habría conservado la mejor.

Livingstone pasó a demostrar cómo la presencia de la hemoglobina S en una población dificulta la propagación de la hemoglobina E en ella. El paludismo irrumpe en un lugar repleto de portadores de la hemoglobina normal y toda nueva mutación que ofrezca una pequeña ventaja frente a la infección puede extenderse con rapidez. Pero una población ya provista

de la mutación protectora de la hemoglobina S está expuesta a un riesgo de muerte menor. Los portadores de los glóbulos falciformes (o drepanocitos) todavía afrontan riesgos nada envidiables, pero la hemoglobina E supone una magra ventaja relativa en una población que ya posee esa forma imperfecta de resistencia. Contra toda lógica, no solo importa la suerte de tener la mutación, sino también el *momento* en que aparece. Una modificación parcial que acarrea efectos secundarios nocivos puede ganar, al menos durante los escasos milenios que lleva nuestra especie adaptándose al paludismo.

Desde que el hombre empezó a luchar contra esta enfermedad, surgieron cambios genéticos que reforzaron la inmunidad contra ella, cambios diversos en lugares distintos. Todos comenzaron como una mutación fortuita que consiguió persistir en una población pequeña, a pesar de su extremada rareza. Probablemente ninguna de esas mutaciones habría durado lo bastante para consolidarse, pero el rápido y enorme crecimiento demográfico de nuestros antepasados les concedió muchas más oportunidades. Conforme hemos proliferado y nos hemos extendido a nuevas zonas del planeta, las mutaciones se han adaptado con rapidez a los nuevos hogares gracias, precisamente, al enorme tamaño de las poblaciones.

En lugar de una masa anodina de clones de color café con leche, comenzamos a vislumbrar un espléndido *collage* de tonalidades: piel oscura, rubios pecosos y sorprendentes combinaciones de ojos verdes y piel olivácea

NUESTRO FUTURO EVOLUTIVO

Hoy los humanos seguimos evolucionando. A diferencia del pasado remoto, del que nos vemos obligados a deducir la acción de la selección a partir de los efectos que han quedado grabados en los genes, hoy los científicos pueden observar la evolución humana en plena acción, a menudo a través del estudio de tendencias en la salud y la reproducción.

Los avances médicos, la higiene y las vacunas han dilatado enormemente la esperanza de vida, aunque la natalidad todavía vacila en muchas poblaciones.

En el África subsahariana, las mujeres portadoras de cierta variante del gen *FLT1* y que se quedan embarazadas en la estación palúdica tienen una probabilidad algo mayor de dar a luz que las que carecen de la variante, porque las primeras tienden a sufrir menos infecciones del parásito en la placenta. No sabemos por qué el gen reduce el riesgo de paludismo placentario, pero el efecto es profundo y mensurable.

Stephen Stearns, de la Universidad Yale, y sus colaboradores han examinado estudios de salud pública a largo plazo para averiguar qué caracteres pueden estar vinculados con las tasas de natalidad actuales. Durante los últimos 60 años, las mujeres estadounidenses de escasa estatura y voluminosas que presentan bajos niveles de colesterol han sido en promedio un poco más prolíficas que las de rasgos opuestos. Todavía no está claro la naturaleza de la relación entre esos caracteres y el tamaño de la familia.

Nuevos estudios de salud pública en marcha, como el Biobank, en el Reino Unido, analizarán los genotipos y la salud de cientos de miles de personas a lo largo de su vida. Este tipo de investigaciones se emprenden porque las interacciones de los genes son complejas y es preciso estudiar miles de casos para entender los cambios genéticos que se ocultan detrás de la salud. Trazar la ascendencia de las mutaciones humanas nos da un enorme poder para observar la evolución a lo largo de cientos de generaciones, pero puede enturbiar las complejas interacciones con el ambiente, la supervivencia y la fecundidad reveladas en el pasado. Podemos detectar los cambios a largo plazo, como la persistencia de la lactasa en la edad adulta, pero corremos el riesgo de pasar por alto la dinámica a corto plazo. Las poblaciones humanas están a punto de convertirse en el experimento a largo plazo más observado de la biología evolutiva.

¿Qué caminos tomará la evolución de nuestra especie en el futuro? A lo largo de los últimos milenios, ha emprendido sendas distintas en diferentes poblaciones, pero sin embargo ha mantenido una sorprendente similitud. Las nuevas mutaciones adaptativas tal vez se hayan abierto camino, pero no han conseguido arrinconar a las versiones antiguas de los genes. La mayoría de las variantes ancestrales todavía permanecen con nosotros. Entre tanto, cada año millones de personas se desplazan entre países y continentes, lo que genera un volumen de intercambio genético y mezclas sin precedentes.

Con ese ritmo acelerado de mestizaje, parece razonable pensar que los caracteres aditivos (como la pigmentación, en la que numerosos genes contribuyen de modo independiente a teñir la piel) cada vez se hallarán más mezclados en los humanos del futuro. ¿Podría ser que la diversidad de coloridos que observamos hoy se vaya difuminando hasta adquirir una tonalidad homogénea?

La respuesta es no. Muchos de los rasgos que distinguen a las poblaciones humanas no son aditivos. Incluso la pigmentación cutánea dista de ser tan sencilla, como se aprecia fácilmente en los mestizos de Estados Unidos, México y Brasil. En lugar de una masa anodina de clones de color café con leche, comenzamos a vislumbrar un espléndido *collage* de tonalidades: piel oscura, rubios pecosos y sorprendentes combinaciones de ojos verdes y piel olivácea. Cada uno de nuestros descendientes será un mosaico viviente de la historia humana.

PARA SABER MÁS

Convergent adaptation of human lactase persistence in Africa and Europe. Sarah A. Tishkoff et al. en *Nature Genetics*, vol. 39, n.º 1, págs. 31-40, enero de 2007.
The origins of lactase persistence in Europe. Yuval Itan et al. en *PloS Computational Biology*, vol. 5, n.º 8, e1000491, agosto de 2009.
The milk revolution. Andrew Curry en *Nature*, vol. 500, págs. 20-22, agosto de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

La evolución de la especie humana. Sherwood L. Washburn en *IyC*, noviembre de 1978.
El *Homo sapiens* del futuro. Peter Ward en *IyC*, enero de 2009.
Genes, cultura y dieta. O. Arjamaa y T. Vuorisalo en *IyC*, junio de 2010.

por Marc Boada Ferrer



Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.

Creación de una polimeroteca

Una colección metódica de polímeros permite ahondar en las propiedades y aplicaciones de estos materiales, extraordinariamente diversos y versátiles

La nuestra es una especie muy industriosa, tanto, que la naturaleza se nos queda corta —al menos en lo que a materiales técnicos se refiere—. A los diversos productos naturales que beneficiamos sin más, como rocas o maderas, debemos sumar los productos artificiales que obtenemos de su transformación, como el cemento o el papel. Pero eso no es aún suficiente para surtir de recursos a una civilización desarrollada o para facilitar que un grupo humano se desarrolle hasta un grado de civilización como el nuestro. Por suerte, siglos de investigación química han llevado las propiedades de la materia a cotas antaño inimaginables. Hoy vivimos rodeados de materiales inexistentes en la naturaleza, fabricados en condiciones de laboratorio, diseñados para funciones específicas y con propiedades concretas. Nos referimos, como el avispado lector ya intuye, a los materiales sintéticos.

Materiales de síntesis hay muchos. Dedicaremos esta sección a un grupo de importancia capital: el de los plásticos, que, pese a su aparente modestia, han permitido una democratización impensable de los bienes de consumo. Su irrupción masiva en el mercado, solo un par de generaciones atrás, fue revolucionaria. Preguntemos a nuestros mayores cómo se sintieron al estrenar su primer objeto de plexiglás, material de rabiosa actualidad a partir de 1930 junto con el PVC y el poliestireno. La baquelita, aparecida antes, en 1907, ya había preparado el mercado para novedosos y sorprendentes productos. Rememoremos el aspecto de los vetustos teléfonos de aquella época, con una sólida carcasa de un material negro, tenaz y brillante, y un auricular muy pesado hecho con esa misma sustancia, incombustible y dura.

Luego, a mediados de ese mismo siglo, la versatilidad de los plásticos quedó más que demostrada al aparecer nuevos compuestos con propiedades muy bien

Caucho
Neopreno
Silicona
Elastómero de poliuretano
Poliestireno expandido
Metacrilato
Policarbonato
Polietileno tereftalato
PVC
Resina de poliuretano
Resina epoxi
Poliéster
Polietileno
Polipropileno
Nailon
Teflón
Baquelita
Melamina

LOS POLÍMEROS Y ELASTÓMEROS de la tabla, en el mismo orden.

MARC BOADA

expresadas como la resistencia química o la elasticidad. Nos referimos al nailon, el polietileno o el teflón. Y lo sorprendente es que solo habían pasado poco más de cien años desde los primeros experimentos que habían llevado del caucho natural a la goma vulcanizada y de la celulosa vegetal al celuloide.

En ese siglo de desarrollo frenético de enormes moléculas poliméricas se avanzó síntesis a síntesis hasta una nueva etapa caracterizada por el uso de catalizadores. En 1952, Karl Ziegler consiguió producir polietileno a partir del etileno gaseoso mediante catalizadores de óxidos metálicos sobre sílice o alúmina. Poco después llegarían las técnicas para la producción de moléculas de gran tamaño con un alto grado de ordenamiento espacial y, por fin, los procesos de fabricación para diversos tipos de resinas sintéticas —de los cuales nos beneficiamos los experimentadores cada vez que utilizamos un adhesivo de altas prestaciones. [*Véase* «Nuevos polímeros», por Eric Baer; Investigación y Ciencia, noviembre de 1986 *y* «Nuevas herramientas químicas para crear plásticos», por John A. Ewen; Investigación y Ciencia, julio de 1997.]

Precisamente el uso de esos utilísimos adhesivos nos permite entender qué es un plástico y cómo se obtiene su estructura característica. Tomemos unos tubos de pegamento epoxi y mezclemos los dos componentes exactamente con las dosificaciones que indica el fabricante. Hagámoslo en cantidad suficiente como para rellenar una de las concavidades de un molde para cubitos de hielo, que previamente habremos recubierto con una fina capa de aceite, a modo de desmoldeante. Una vez lleno el recipiente, esperemos un poco y comprobaremos cómo el material se calienta y termina convirtiéndose en un sólido. ¿Por qué? Al mezclar los dos componentes hemos iniciado una reacción química de polimerización que, en este caso y a diferencia de otras resinas, no se produce ni por catálisis ni por activación. Al contrario, los dos componentes son correactivos: juntos forman macromoléculas conectadas en estructuras tupidas.

Si nos ha sobrado algo del preparado, podemos observar el fenómeno opuesto a una rápida solidificación. Para ello lo conservaremos en estado fluido durante unas horas más en la nevera, ya que con una baja temperatura conseguiremos detener o, al menos ralentizar, la polimerización. Esta estrategia es también aconsejable para conservar las diversas resinas que el experimentador usa en su día a día (muchas de ellas desarrollan de forma espontánea fenómenos de reticulado).

Como es lógico, el consumidor exige productos de reacción rápida. El caso extremo es el de los adhesivos que curan (polimerizan) gracias a la radiación ultravioleta, ideales, por ejemplo, para pegar un retrovisor roto o piezas transparentes en las que las juntas deben ser casi invisibles. Para todos estos materiales con aceleradores, la conservación en frío es muy deseable; lo mismo ocurre con las resinas epoxídicas, capaces de endurecer en minutos. La selección de distintas combinaciones de resinas y endurecedores no solo afecta al tiempo de reacción, también hace posible que el plástico final sea duro y frágil, o flexible y blando. De ahí que podamos encontrar resinas epoxi diseñadas para unir los más diversos materiales. Y si a ello sumamos las propiedades que aportan cargas (productos que se incorporan para mejorar el comportamiento físico y reducir el precio), colorantes y aditivos (que modifican el tiempo de endurecimiento o la estabilidad, entre otros parámetros), comprendemos por qué podemos utilizarlas en una gran variedad de proyectos.

Una vez fría, saquemos la pieza endurecida del molde de cubitos. Su densidad es baja comparada con la mayoría de los metales; golpeada con el martillo, resiste impertérrita casi tanto como estos, y bajo el taladro se comporta como una madera muy dura que podemos roscar a voluntad. Ante nosotros tenemos un excelente material de mecanizado, moldeado a medida y con un comportamiento mecánico extraordinario.

Sigamos experimentando. Si tocamos con nuestro cubito epoxídico un electroscopio cargado, este no sufrirá casi ningún cambio, muestra inequívoca de una rigidez dieléctrica que lo capacita como material de primera elección para modelar los aisladores eléctricos de nuestros experimentos caseros de alta tensión.

Investiguemos ahora su comportamiento térmico. Calentada la muestra con una pistola de aire caliente o con una pequeña llama, comprobamos que, pese a que se enciende con dificultad, funde luego y se descompone a la vez, ardiendo y emitiendo humos densos que, olfateados a

¿QUÉ ES Y CÓMO SE OBTIENE UN POLÍMERO?

Los polímeros son sustancias formadas por moléculas de peso elevado, es decir, por muchísimos átomos unidos entre sí. Esto es posible gracias a las particularidades del átomo de carbono, que, debido a su especial configuración electrónica, puede formar muy diversos enlaces. El resultado son moléculas complejas en las que este átomo coordina varias «piezas», los monómeros. Estos pueden unirse entre sí una y otra vez, formando unidades mayores que pueden repetirse indefinidamente, los polímeros.

La formación de polímeros se denomina polimerización y puede producirse de formas distintas. Estas son, a grandes rasgos, las principales:

ADICIÓN O POLIADICIÓN

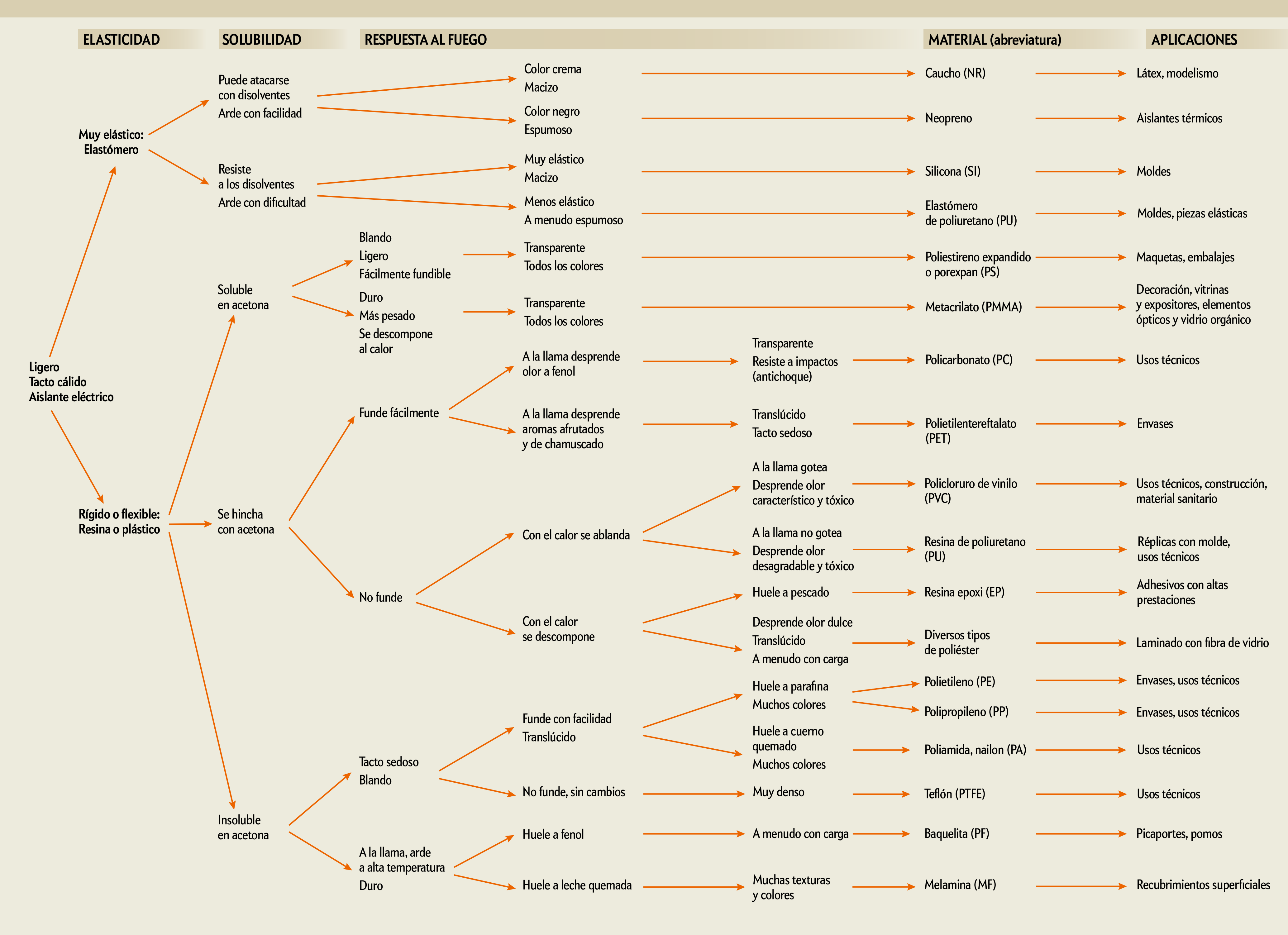
Es el método más típico. Consiste en la unión de moléculas iguales de monómero, activadas con la ayuda de alguna sustancia activadora o catalizadora; una vez iniciado el proceso, progresa con rapidez. En ocasiones se polimerizan conjuntamente dos tipos de monómeros, con lo que se consigue un material con propiedades nuevas, un copolímero.

CONDENSACIÓN

Tiene lugar por la reacción de moléculas de dos sustancias con grupos reactivos en dos de sus extremos, o entre moléculas de una misma sustancia con dos extremos reactivos distintos en su molécula.

Ambos tipos de polimerización pueden llevarse a cabo «en masa» (solo con los monómeros), o bien en presencia de disolventes, o en emulsión, en cuyo caso los monómeros que reaccionan y los polímeros obtenidos se hallan en forma de gotitas dispersas en agua.

CLASIFICACIÓN DE LOS ELASTÓMEROS Y PLÁSTICOS MÁS COMUNES



una distancia prudente, huelen a pescado. Dado que su composición es variable, a veces también recuerdan el olor a cuerno quemado —eso sí, como diría el químico, siempre con unas notas fenólicas.

Este último paquete de observaciones sensoriales es algo más que anecdótico. Para empezar, recordemos que no todos los plásticos funden con descomposición y llama. Muchos lo hacen hasta convertirse en fluidos más o menos viscosos. Se trata de los plásticos termoplásticos. Lógicamente, tienen amplísimos usos en moldeo y soplado; envases y juguetes de todo tipo lo demuestran. Por el contrario, los que, como las resinas epoxi, no llegan a fundir y, sobrepasada determinada temperatura, queman hasta su destrucción, los llamaremos plásticos termoestables. En general, estos soportan mayor temperatura y se aplican entre muchos otros en el sector eléctrico y el de la automoción. Además de ser un parámetro crítico para estas industrias, el comportamiento frente al calor es también muy importante para su clasificación —más adelante volveremos sobre este asunto—. Y si de clasificación se trata, el reto es importante porque los plásticos son, a ojos del profano, relativamente similares; solo con el desarrollo de algunas habilidades podremos descubrir, ante un objeto cualquiera, con qué tipo de polímero se ha fabricado.

Para empezar, observemos la tabla. En ella hemos incluido una representación de los principales tipos de polímeros frecuentes en la vida diaria. Sin embargo, no debemos olvidar que cada objeto responde a una formulación concreta que puede modificar en mucho sus propiedades; las indicaciones deben considerarse, por tanto, generales.

Las primeras características que hemos elegido para saber si nos hallamos ante un polímero son: ligero, de tacto cálido y aislante eléctrico. Pero ni siquiera eso es absolutamente cierto. El teflón es tan denso como las aleaciones ligeras, y algunos polímeros incorporan tanta carga metálica que resultan fríos como los metales y pueden ser óptimos conductores eléctricos —eso sí, son raros.

La siguiente columna de la tabla separa las muestras en dos grandes grupos: los elásticos, como las gomas, y los rígidos, que también son muy diversos y pueden ser poco o muy flexibles. De nuevo, nos hallamos ante un abanico inconmensurable de posibilidades. Un buen ejemplo corresponde al PVC, útil tanto para piezas rígidas de fontanería, como para láminas y películas flexibles, óptimas para los accesorios de playa.

El siguiente paso para su clasificación consiste en someter el material a la acción de algún disolvente orgánico, el más accesible de los cuales es la acetona. Sumergiendo unas virutas o fragmentos del material observaremos rápidamente tres comportamientos típicos de los plásticos ante el ataque químico: la disolución (perfecta en el caso del poliestireno), el hinchamiento (como el que sufre el policarbonato) y la insolubilidad (caso de la baquelita o la melamina, o, más resistentes todavía, los plásticos fluorados, capaces de soportar el ataque de disolventes, ácidos y álcalis concentrados).

Llega por fin el turno de las pruebas de comportamiento ante el fuego, la llama y la percepción del olor de los humos. Antes de efectuar ninguna cata, el lector debe tener en cuenta que estas solo deben realizarse en ciertas muestras y con extrema precaución, ya que algunos polímeros emiten vapores perniciosos. Es el caso del PVC y el poliuretano, que son tóxicos, y del teflón, con el que no debe realizarse el ensayo ya que emite vapores corrosivos y muy nocivos. Destaquemos, eso sí, que este último resiste espectacularmente al calor, pudiéndose calentar algunas formulaciones hasta unos 250 ºC sin presentar síntomas de degradación.

La clasificación a partir de los vapores contempla un par de pasos. En primer lugar, tomaremos la muestra con unas pinzas para ponerla en la llama de un mechero Bunsen. Observaremos cuánto tarda en encenderse y si, retirada de la llama, sigue ardiendo. Luego, apagaremos la llama que pueda haber, cuidando de no producir proyecciones de plástico fundido. Finalmente, y con un leve movimiento de abanico de la mano, dispersaremos el humo, intentando captar su aroma con cautela, sin ingerirlo. Algunos olores plásticos son muy típicos; todos los conocemos. El polietileno y el polipropileno huelen a parafina, con unas notas afrutadas. No menos característico es el olor del metacrilato, más afrutado todavía y perfectamente perceptible cuando el material se mecaniza. Otros, al calentarse fuertemente, huelen más o menos a fenol; el más típico y conocido representante de esta categoría es la baquelita quemada, cuyo olor solemos asociar a un aparato eléctrico chamuscado o sobrecalentado.

Para la clasificación también podemos recurrir a la marca de composición que incorporan muchos objetos. Y, en caso de no haberla, siempre podremos guiarnos por el tipo de aplicación. Sin embargo, dadas las múltiples transformaciones que admiten estos materiales, es fácil confundirse. Pensemos en las espumas. Su densidad aparente disminuye de forma espectacular y sus aplicaciones cambian radicalmente. Encontramos espumas de burbuja abierta, útiles como filtros. En otros casos, las burbujas son cerradas y minimizan la conductividad térmica, con lo que las podremos utilizar a modo de aislantes térmicos.

En ocasiones deseamos polímeros de gran dureza o con coeficiente de fricción mínimo. Ningún problema. Podremos localizar barras de diversos tipos de polímeros fluorados cargados con polvo de grafito e incluso de bronce. En ese caso, la densidad se dispara, alcanzando la del titanio. Obviamente, estos productos son caros, pero una industria eficiente sería impensable sin ellos.

Por todos los motivos anteriores, el mercado ofrece un amplísimo abanico de formatos. Pensemos en las enormes placas de policarbonato que configuran las peceras de los grandes acuarios públicos. Puede que estén fuera de nuestro alcance, pero en toda la península podremos encontrar almacenes que nos suministren la placa estándar (de dos metros por uno), en espesores que van desde la décima de milímetro hasta, como mínimo, el decímetro. En este mismo formato localizaremos paneles celulares, espumas rígidas y flexibles, incluso placas de resinas fenólicas reforzadas con tejidos y fibras. Algo similar ocurre en los formatos longitudinales. Desde el tubo de metacrilato de 500 milímetros de diámetro y dos metros de longitud, con espesores de pared entre los milímetros y los centímetros, podremos adquirir decenas de combinaciones distintas; lo mismo sucede con el PVC y otros polímeros. Y en forma de barras o tubos de gran espesor (dollas) podremos comprar casi todos los plásticos técnicos, con o sin cargas, desde pocos milímetros hasta varios decímetros de diámetro.

El universo de los plásticos es casi infinito. Y está ahí no por obra de la naturaleza, sino gracias al ingenio del ser humano, puesto a nuestra disposición para resolver las más diversas necesidades técnicas. La creación de una colección sistemática de estos maravillosos materiales puede ser el paso previo para que esto sea posible.

por Alejandro Pérez Carballo

Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.



Lenguaje, convenciones y coordinación

De cómo estipular el significado de una palabra a la teoría de juegos

La relación entre las palabras de un idioma y su significado parece puramente convencional. Hasta donde sabemos, cada una de las voces del castellano podría haber adquirido un significado distinto del que tiene en la actualidad. La palabra *jirafa*, por ejemplo, podría tomar el significado que asignamos a *gafa*, y viceversa. En esta variante del español, la frase *La gafa se puso sus jirafas* querría decir que la jirafa se puso sus gafas.

Las lenguas «artificiales», como el esperanto, nos permiten analizar las maneras en que puede estipularse el significado de una nueva palabra. Por supuesto, los idiomas naturales no surgieron de un modo tan simple. Sabemos bien que no hubo ningún grupo de personas que, tras una larga reunión, decidiese el significado de todas y cada una de las palabras del castellano.

Pero, al menos en principio, podría haber ocurrido así. Y, si bien desconocemos la manera en que los hablantes del español llegaron a ponerse de acuerdo sobre el significado de las palabras, sí parece probable que estas lo adquiriesen a partir de algún proceso de estipulación.

Jirafas y farijas

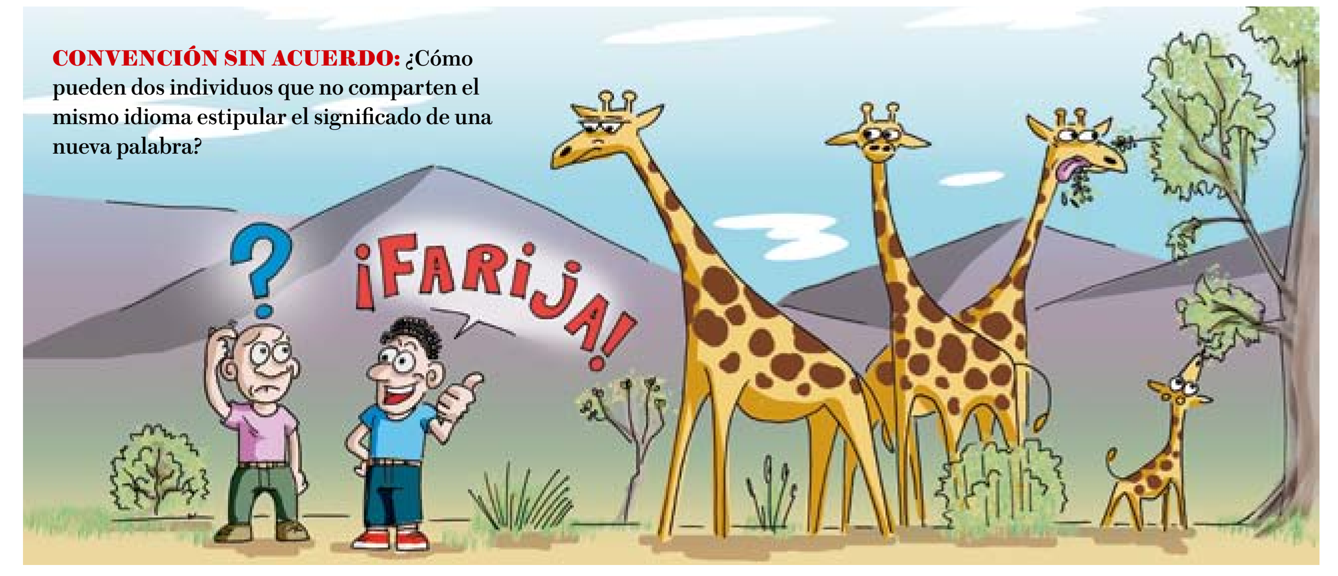
Para que el significado de una palabra pueda surgir a partir de un acuerdo entre los hablantes, estos deben poder comunicarse entre sí. Pero, a menos que ya dispongan de una lengua común —por primitiva que esta sea—, resulta difícil imaginar de dónde podría provenir esa capacidad de comunicación. A partir de aquí resulta inmediato ver que tuvo que existir algún idioma cuyas palabras no adquirieron su significado por medio de un acuerdo explícito en una lengua previa. Así pues, si aceptamos que la relación entre las palabras de un idioma y su significado es convencional, debería resultar posible establecer una convención sin necesidad de llegar a un acuerdo. Pero ¿cómo?

Imaginemos una población cuyos individuos carecen de idioma común (bien porque no tienen ninguno, o bien porque cada uno de ellos habla una lengua distinta). ¿Cómo podrían desarrollar uno?

Para considerar una situación concreta, supongamos que los miembros de nuestro grupo desean crear un idioma para mantener en buen estado la población de jirafas. Tal vez podrían comenzar inventando una palabra para referirse a estos animales; no obstante, de inmediato aparecerían problemas.

Imaginemos que Andrés desea introducir la palabra *farija* para referirse a las jirafas. Nuestro amigo puede ir con Bernardo a ver las jirafas, señalar una y decir: «¡Farija!». Sin embargo, Bernardo no tiene ninguna forma de saber qué pretende Andrés. Podría pensar que su interlocutor desea introducir una palabra que significa «ese animal me pertenece» o una que significa «cena». Pero, aunque Bernardo entendiese que Andrés está intentando introducir un nuevo vocablo, existen multitud de posibilidades acerca de lo que Andrés podría querer decir con *farija*. Y eso que llegar a un acuerdo sobre cómo llamar a un objeto cercano resulta relativamente sencillo. ¡Imagine cuán difícil sería estipular una palabra que signifique «onomatopeya»!

Recordemos que no nos estamos preguntando acerca del proceso por el que las palabras del castellano adquirieron su sig-

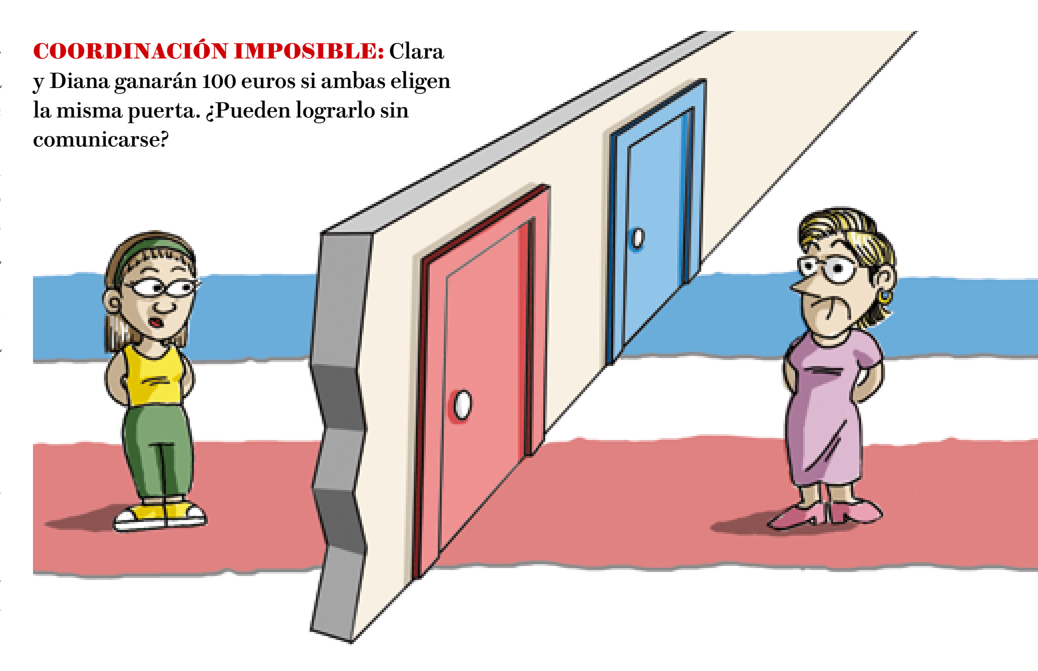


CONVENCIÓN SIN ACUERDO: ¿Cómo pueden dos individuos que no comparten el mismo idioma estipular el significado de una nueva palabra?

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

nificado. La cuestión es otra: ¿cómo es posible que varios individuos puedan crear una lengua común si carecen de una en la que comunicarse? Buscamos algún método que nos permita establecer una convención en ausencia de acuerdos, por más que este no se corresponda con la forma en que los hablantes de las lenguas naturales llegaron a desarrollarlas. Sin embargo, si no logramos encontrar ningún procedimiento de este tipo, tal vez debamos replantearnos la idea de que es gracias a las convenciones que las palabras adquieren su significado.

COORDINACIÓN IMPOSIBLE: Clara y Diana ganarán 100 euros si ambas eligen la misma puerta. ¿Pueden lograrlo sin comunicarse?



Problemas de coordinación

Clara y Diana han sido invitadas a participar en un juego. Deben situarse a lados opuestos de un muro en el que hay dos puertas: una roja y otra azul. Sin comunicarse entre ellas, nuestras amigas deberán decidir frente a qué puerta colocarse. Pasado cierto tiempo, estas se abrirán. Si cuando eso ocurra Clara y Diana se encuentran frente a frente, cada una recibirá 100 euros. En caso contrario, se irán con las manos vacías.

La matriz de recompensas para Clara y Diana tiene la siguiente forma, donde C_r significa «Clara va a la puerta roja», D_a abrevia «Diana va a la puerta azul», etcétera:

	D_r	D_a
C_r	(100 €, 100 €)	(0 €, 0 €)
C_a	(0 €, 0 €)	(100 €, 100 €)

Desde el punto de vista de Clara y Diana, hay dos posibilidades, (C_a, D_a) y (C_r, D_r), que resultan mejores que las demás. Sin embargo, ninguna de esas dos opciones es mejor que la otra: Clara —y lo mismo se aplica a Diana— no tiene ninguna razón para optar por C_r en vez de por C_a. El problema al que se enfrentan Clara y Diana es uno de coordinación. Y, a menos que una de ellas cuente con un motivo para pensar qué hará su compañera, no parece haber solución posible.

El problema de Andrés y Bernardo con la palabra *farija* resulta muy similar. Para verlo, consideremos una versión modificada del juego anterior.

Eva y Fabio se encuentran separados por un edificio en el que hay dos pares de puertas enfrentadas: dos rojas y dos azules. Esta vez, sin embargo, hay una jirafa escondida en medio de uno de los pares de puertas: bien entre las dos puertas azules, bien entre las dos rojas.

Nuestros amigos ganan el juego si Fabio abre la puerta tras la cual se encuentra la jirafa. Para ello, cuenta con la ayuda de Eva, quien tiene a su disposición dos palabras en un idioma que desconoce y que sabe que Fabio también desconoce. Tras haber visto dónde está la jirafa, Eva debe elegir una de las palabras y pronunciarla en voz alta. Una vez la oiga, Fabio habrá de decidirse por una de las dos puertas. Si, al abrirla, encuentra la jirafa, cada uno de ellos recibirá 100 euros. En caso contrario no obtendrán nada.

Tanto Eva como Fabio saben que las palabras de significado desconocido son *kùla* y *pulú*. Antes de ver dónde está la jirafa, Eva debe decantarse por una de dos opciones: o bien decir *kùla* si la jirafa se halla tras la puerta roja y *pulú* si se esconde tras de la azul (posibilidad que denotaremos E_{rk}), o bien decir *pulú* si la jirafa está detrás la puerta roja y *kùla* si se encuentra tras la azul (la cual simbolizaremos por E_{rp}).

Por su parte, y antes de que Eva hable, Fabio deberá elegir entre dos posibilidades: abrir la puerta roja si oye *kùla* y la azul si escucha *pulú* (F_{kr}), o abrir la puerta roja si Eva dice *pulú* y la azul si pronuncia *kùla* (F_{pr}).

Tras examinar un momento todas las posibilidades, el lector comprobará con facilidad que la matriz de recompensas para Eva y Fabio presenta la misma forma que antes:

	F_{kr}	F_{pr}
E_{rk}	(100 €, 100 €)	(0 €, 0 €)
E_{rp}	(0 €, 0 €)	(100 €, 100 €)

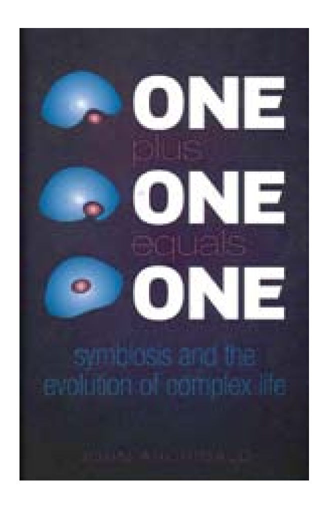
De nuevo, tenemos dos opciones que, desde el punto de vista de Eva y Fabio, son mejores que las demás: (E_{rk}, F_{kr}) y (E_{rp}, F_{pr}). De modo que cada uno se enfrenta a la siguiente situación: para ganar, ha de coordinarse con el otro sobre cómo usar las palabras *kùla* y *pulú*. El problema, una vez más, es cómo lograrlo si no pueden comunicarse.

A partir de herramientas matemáticas sencillas, hemos visto que dos problemas de apariencia muy distinta (el que afrontaban Andrés y Bernardo y el que ocupaba a Clara y Diana) poseen una estructura común. Así pues, si lográsemos ofrecer algunas soluciones a problemas de coordinación simples, tal vez nos haríamos una idea de cómo dos agentes racionales que no son capaces de comunicarse pueden llegar a desarrollar un idioma básico.

¿Cómo resolver el problema de coordinación al que se enfrentan Clara y Diana? En la columna del mes de enero examinaremos algunas de las soluciones posibles.

PARA SABER MÁS

En su libro **Convention: A philosophical study** (Harvard University Press, 1969), David K. Lewis ofrece un análisis detallado de las convenciones —y, en particular, de la idea de que el significado de las palabras surja como resultado de aquellas— y su relación con los problemas de coordinación. La discusión clásica acerca de esta clase de problemas en teoría de juegos es **The strategy of conflict**, de Thomas Schelling (Harvard University Press, 1960).



ONE PLUS ONE EQUALS ONE. SYMBIOSIS AND THE EVOLUTION OF COMPLEX LIFE

Por John Archibald. Oxford University Press, Oxford, 2014.

Simbiosis

Una perspectiva revolucionaria de la vida y su historia

Nos encontramos en medio de una revolución científica construida sobre nuestro conocimiento del ADN, el material hereditario de la vida. Auxiliados por las herramientas de la biología molecular, sondeamos el mundo entorno y nos aprovechamos del mismo de una manera impensable decenios atrás. ¿Necesitamos identificar una bacteria y seguir su rastro en un brote hospitalario? En 24 horas podemos obtener el perfil génico completo del germen desencadenante. ¿Nos interesa saber la constitución de nuestros parientes neandertales? Los paleoantropólogos han abordado la cuestión con muestras de ADN extraídas de huesos fósiles. Introducimos ADN humano en *Escherichia coli* para que la enterobacteria fabrique insulina.

En torno a 1970, Paul Berg y Janet Mertz infectaron *E. coli* con un virus creado artificialmente, a partir de virus de *E. coli* y del virus SV40, un virus de los simios. Se sabía que, en la naturaleza, los virus mediaban la transferencia de genes entre bacterias. A Berg le interesaba resolver la cuestión de si un sistema de transferencia de genes mediada por virus se daba también en las células de mamífero. El virus creado debía explorar esa posibilidad. También era importante averiguar si podía infectar a *E. coli*. Varios colegas plantearon su preocupación por las consecuencias. *E. coli* es un componente natural de la flora bacteriana de nuestro intestino. ¿Qué pasaría si el virus quimérico se escapaba del laboratorio y causaba una epidemia oncológica? Berg creía que semejante posibilidad era muy remota. Con todo, los experimentos se suspendieron hasta disponer de pruebas contundentes.

Berg y Metz no fueron los únicos en crear moléculas quiméricas de ADN. Stanley Cohen y Herbert Boyer habían estado experimentando con la inserción de ADN foráneo en plásmidos (moléculas de ADN circulares que se dan en células bacterianas) de *E. coli*. En 1973 anunciaron que un gen de ARN ribosómico extraído de rana se había clonado e integrado en *E. coli*. Las posibilidades que ello presentaba para la investigación básica y aplicada resultaron inmensas.

La ciencia del ADN ha renovado, entre otras, nuestra interpretación de las relaciones entre organismos. Todos los seres vivos, de los microorganismos a los humanos, comparten un origen común. Nos hemos acercado a la historia inicial de la vida y hemos adquirido cierto conocimiento sobre la aparición de las células complejas, las eucariotas, hace dos mil millones de años. La evolución ha ido combinando y conjuntando los componentes moleculares de la vida. Cuando los biólogos moleculares se adentraron en la selva microbiana descubrieron todo un mundo primigenio, las arqueas. Y descifraron claves, en el ADN de las células eucariotas, que apuntaban a una mezcolanza de bacterias de vida libre.

La célula eucariota, compleja, evolucionó a partir de células procariotas, más simples. Una transición que persiste envuelta en el misterio. La endosimbiosis, la forma más acabada de la simbiosis, desempeñó un papel motor. En particular, a la endosimbiosis se debió la incorporación de mitocondrias y cloroplastos. Las mitocondrias fueron en otro tiempo bacterias de vida libre. Dígase lo propio de los cloroplastos de las células vegetales. Introducida así la fotosíntesis oxigénica en los eucariotas, lo que siguió fue una cadena de acontecimientos que condujeron a la transformación de los océanos, los continentes y la atmósfera. Nuestras células son quimeras, formadas a través de la amalgama de dos tipos de células simples, una en el interior de otra. Las células complejas que componen animales y plantas son el resultado de fusiones simbióticas que se han ido presentando a lo largo de la historia de la vida.

La simbiosis (la vida conjunta de formas de vida distinta) es un fenómeno común en la naturaleza. Encierra la clave para comprender el salto en la complejidad celular que condujo al desarrollo de los eucariotas. Los científicos están descubriendo ejemplos de fusiones simbióticas sucesivas, con organismos incluidos en otros organismos. La biología molecular está demostrando que la historia de la vida es mucho más compleja de lo que nos habíamos imaginado.

El concepto de simbiosis arranca del trabajo de Simon Schwender (1829-1919), Antón de Bary (1831-1888) y Albert Frank (1839-1900). Los dos primeros tomaron a los líquenes como organismo de investigación; a las micorrizas el tercero. Los líquenes suelen crecer sobre superficies estables que reciben un adarme de luz solar. Constan de un talo, red estratificada filamentosa fúngica con células algales en su interior. Esta asociación entre alga y hongo ha evolucionado a lo largo de quinientos millones de años. La simbiosis de hongos y raíces de plantas forma micorrizas. Hasta el 90 por ciento de las plantas superiores establecen simbiosis micorrícicas. Se supone que las algas verdes no hubieran colonizado nunca tierra firme, sin la ayuda de los hongos.

Debemos a Constantin Mereschkowsky (1855-1921) el primer trabajo elaborado sobre endosimbiosis, en particular de los cloroplastos. Combinando conceptos de biología vegetal y de biología algal con ideas de simbiosis, desarrolló la tesis de la *simbiogénesis*, que definía el origen de organismos a través de la conjunción y unificación de dos o más individuos. En esa idea endosimbionte abundó Andreas Schimper, quien planteó la posibilidad de ese origen de los cloroplastos. En lo concerniente a las mitocondrias, Paul Portier no pensó que procedieran de bacterias, sino que eran bacterias en el interior celular. Publicó en 1918 *Les symbiotes*, cuya tesis, aberrante, muy pronto quedó desmentida: las células complejas dependerían de simbiontes bacterianos.

Hasta quince intentos, por lo menos, realizó Lynn Margulis antes de ver publicada su hipótesis en 1967 en el *Journal of Theoretical Biology* sobre el origen bacteriano de las mitocondrias. Mar-

gulis propuso también que los flagelos eucariotas se adquirieran por simbiosis con bacterias espiroquetas. Más tarde, defendería que los simbiontes formados a partir de organismos genéticamente distintos explicarían el proceso de especiación. En 1967 Jostein Goksoyr publicó en *Nature* una filogenia en la que los eucariotas derivaban de asociaciones simbióticas entre múltiples linajes procariotas. Philip John y Bob Whatley señalaron, en 1975, que la bacteria aeróbica del suelo *Paracoccus denitrificans* presentaba una serie de rasgos de su respiración celular que remedaban la función de las mitocondrias, y realizaron ensayos con el fin de descubrir el curso evolutivo de la conversión de bacteria de vida libre en mitocondria.

La alopoliploidización es la combinación de genomas procedentes de dos especies diferentes. Ha constituido fuente principal de innovación evolutiva y motor de especiación y adaptación ambiental. En el reino vegetal contribuyó en medida importante a la domesticación de las plantas. Se da por cierto que la alopoliploidización ocurrió a través de procesos de hibridación entre especies, acompañados o seguidos por duplicación genómica. Aunque muchos alopoliploides surgieron de especies estrechamente emparentadas (congéneres), existen otras especies alopoliploides que emergieron a partir de especies progenitoras más distantes, pertenecientes a géneros e incluso a tribus diferentes.

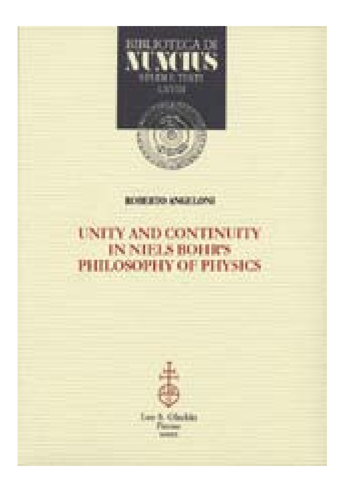
Abundan en la naturaleza las bacterias que experimentan tasas elevadas de mutaciones, lo mismo en las poblaciones naturales que en las multiplicadas en el laboratorio. Una de las causas inductoras de la presión de selección es la evolución antagonista con los parásitos. En 2007 se demostró in vitro que la coevolución antagonista con parásitos víricos promovía la evolución de la mutación de la bacteria *Pseudomonas fluorescens*.

La simbiosis mutualista puede aparecer incluso sin que hubiera coevolución previa. La mayoría de las asociaciones mutualistas beneficiosas entre individuos de diferentes especies, denominadas simbiosis mutualistas, han permitido grandes innovaciones ecológicas y se encuentran en la base de las grandes transiciones registradas en el árbol de la vida. Por ejemplo, el antepasado de los vegetales domesticó bacterias fotosintéticas endosimbiontes, los cloroplastos de hoy, para fijar el carbono. Esa asociación incrementó drásticamente el hábitat de esas bacterias fotosintéticas: de ecosistemas acuáticos a ecosistemas continentales. Sin embargo, la colonización de tierra firme por las plantas requería una ulterior asociación simbiótica, con simbiontes fúngicos que facilitan la adsorción de nutrientes.

Un ejemplo fascinante de endosimbiosis entre eucariotas y cianobacterias nos los ofrece la diatomea de agua dulce *Rhopalodia gibba*. En el interior de la diatomea habita una cianobacteria endosimbionte que está estrechamente emparentada con el género *Cyanothece*. Las especies de *Cyanothece* se caracterizan por su capacidad para fijar el nitrógeno atmosférico, es decir, para convertir el nitrógeno gaseoso en amonio y otros componentes relacionados. El endosimbionte constituye lo que, en virtud de su morfología, se denomina cuerpo esferoidal. La relación simbiótica estable que se entabla refleja la mutua interdependencia. El organismo hospedante era fotosintético antes de que se produjera la simbiosis. Las diatomeas portan cloroplastos derivados de una absorción endosimbiótica de una alga roja. Nada tiene, pues, de sorprendente que el cuerpo esferoidal no realice la fotosíntesis; lo que sí hace es fijar el nitrógeno, igual que las especies de *Cyanothece* de vida libre.

Al propio tiempo, la biotecnología avanzó imparable. No han cesado las preocupaciones éticas, legales y ambientales. Pero ahora los componentes de la investigación sobre el ADN recombinante son naturales. Se toman de la biosfera microbiana. La enzima de restricción del ADN, EcoRI, procede de *E. coli*; opera como un agente natural de defensa celular frente a material genético extraño. Se han identificado y empleado cientos de proteínas así. Enzimas que unen fragmentos de ADN. La polimerasa Taq se usa para amplificar ADN; procede de la bacteria *Thermus aquaticus*, descubierta en 1965 en los surtidores termales de Yellowstone.

—*Luis Alonso*



UNITY AND CONTINUITY IN NIELS BOHR'S PHILOSOPHY OF PHYSICS

Por Roberto Angeloni. Leo S. Olschki, Florencia, 2013.

Bohr

Unidad de la ciencia, unidad de la física

En 1933, John Archibald Wheeler aducía, en su solicitud de una bolsa de estudio ante el estadounidense Consejo Nacional de Investigación para trasladarse Copenhague y trabajar con Niels Bohr, que su elección se basaba en que «las ideas de Bohr van mucho más allá que las de cualquier otro científico vivo». Algo parecido sentía Werner Heisenberg cuando veía en el danés un filósofo más allá del físico.

Bohr y Wheeler publicaron su primer ensayo conjunto, a finales de los treinta, sobre fisión nuclear explicada en términos cuánticos. El núcleo atómico, que constaba de protones y neutrones, exponían, era como una gota líquida, que empieza vibrando y se elongaba en forma de cacahuete cuando un neutrón emitido por otro núcleo en desintegración colisionaba con él. Wheeler fue convocado para sumarse al proyecto Manhattan. Bohr decía estar más interesado en la filosofía que en los filósofos, atraído por algunas cuestiones filosóficas que emergen en la historia de la ciencia. Preocupado, sobre todo, por las condiciones de posibilidad del conocimiento empírico.

Niels Bohr, nacido en 1885, entró en la Universidad de Copenhague en 1903. Por entonces, todos los alumnos tenían que asistir durante el primer año a un

curso propedéutico de filosofía. Bohr realizó ese curso en 1903 con el profesor Harald Høffding. Estudió física con Christian Christiansen. Desde 1905 comenzó a frecuentar un grupo de alumnos donde debatían sobre los asuntos más dispares. Se licenció en 1909 y dos años más tarde obtuvo el doctorado. Pasó un año en Inglaterra de posdoctorado en Cambridge y Manchester.

A través de Høffding llegó Bohr a la filosofía existencialista de Søren Kierkegaard. Høffding fue un filósofo de la continuidad en un tiempo en que la discontinuidad se había convertido en una realidad cuando Max Planck descubrió el cuanto de acción en 1900. A diferencia de Kierkegaard, Høffding sí creía que se daban saltos en la naturaleza inanimada. Investigaciones ulteriores sobre radiactividad demostraron que las leyes causales deberían ser sustituidas por descripciones estadísticas. De hecho, Bohr renunció a las explicaciones causales y defendió cambios espontáneos antes de familiarizarse con el existencialismo de Kierkegaard. Existía una corriente de simpatía entre Høffding y Bohr. Despertaron el interés de este las clases que aquel impartió sobre una filosofía de la ciencia natural que se espejaba en el trabajo de los físicos, de Copérnico a Newton, de Maxwell a Mach.

Se ha dado por supuesto que el filósofo William James influyó en Bohr. Está más allá de toda duda que hay llamativas analogías entre James y Bohr. De acuerdo con James, solo puede haber pensamiento en asociación con un poseedor específico de ese pensamiento. En consecuencia, pensamiento y pensador, sujeto y objeto se encuentran entrelazados y resulta imposible concebir la objetivación del pensamiento; Bohr subrayaba la necesidad de prestar atención a las circunstancias en que se obtenían las pruebas, en cualquier campo.

La relación de Bohr con el positivismo lógico respaldaba la idea de su interés general por la filosofía. Una atracción que plasmó en el concepto de unidad del conocimiento. Bohr tomó parte en el Segundo Congreso Internacional sobre Unidad de la Ciencia celebrado en Copenhague en 1936, dirigido por los neopositivistas Otto Neurath y Jorgen Jorgensen. Se le invitó a escribir un artículo sobre análisis y síntesis en ciencia de la *International Encyclopedia of Unified Science*, coordinada por Neurath, Jorgensen y Carnap. En el segundo volumen, Bohr reconocía que, pese a la exigencia práctica de concentrar los científicos sus esfuerzos en un dominio concreto del saber, su labor, en cuanto potenciadora del conocimiento, es la unidad. La historia de la ciencia nos revela que el avance de un campo ha conducido a la unificación de aspectos que antes se presentaban separados e inconexos. No solo hay unidad de la ciencia que interpreta el mundo exterior sino también inseparabilidad del análisis epistemológico y psicológico. A diferencia de los neopositivistas, él no busca la unidad en la reducción de todo a la física, sino en la armonía del todo. Es una postura holista.

Así, a lo largo de su carrera Bohr se propuso reconciliar la teoría clásica y la teoría cuántica en un todo racional y coherente, salvar el hiato entre la descripción clásica y la descripción cuántica. Una continuidad que se aprecia en la descripción clásica, donde las coordenadas de espacio, tiempo, energía y momento pueden, en principio, reputarse indivisibles. En la física clásica, la causalidad se da por cierta, en tanto que en la física cuántica comienzan a aceptarse como intrínsecas a la misma las nociones de indeterminación, descripción estadística y distribución probabilista. Si en la física clásica existe una separación tajante entre objeto y sujeto, en la cuántica tal separación solo puede producirse de una manera arbitraria. La mecánica clásica, newtoniana, presentaba una descripción objetiva de la realidad. Con la introducción del cuanto de acción de Planck en los procesos atómicos, se puso en cuestión la concepción determinista de la naturaleza. Las teorías de la física clásica resultaban idealizaciones válidas solo en la descripción de fenómenos suficientemente grandes, donde podía ignorarse el cuanto de acción.

El primer modelo atómico de Bohr se presentó en 1913 en un extenso artículo publicado en tres partes en el volumen 26 del *Philosophical Magazine*. El trabajo se titulaba «On the constitution of atoms and molecules». Aportaba la base teórica para el modelo atómico construido por Rutherford en 1911. Se servía de los conceptos cuánticos para resolver la constitución del átomo: los electrones orbitan alrededor de un núcleo central y alcanzan su estabilidad, al admitir que su momento angular se cuantiza. El tránsito de los electrones de una órbita a otra viene acompañado de la absorción o emisión de energía en forma de luz, dando así cuenta de una serie de líneas en el espectro de emisión del hidrógeno.

La teoría introducida por Bohr en 1913 para explicar las líneas espectrales del hidrógeno lleva su nombre. Daba por supuesto que un solo electrón de masa m viajaba en órbita circular de radio r, a una velocidad v, en torno a un núcleo dotado de carga positiva. El momento angular del electrón sería entonces mvr. Bohr propuso que los electrones pudieran ocupar solo órbitas en las que este momento angular presentara ciertos valores fijos: $h/2\pi$, $2h/2\pi$, $3h/2\pi$... $nh/2\pi$, donde h es la constante de Planck. Ello significa que el momento angular se cuantiza, es decir, presenta solo determinados valores, cada uno de los cuales es múltiplo de $h/2\pi$. Cada valor de n va asociado con una órbita de diferente radio. Bohr suponía que, cuando el átomo emitía o absorbía radiación de frecuencia ν, el electrón saltaba de una órbita a la siguiente; la energía emitida o absorbida en cada salto era igual a $h\nu$.

Esa teoría dio buenos resultados en la predicción de las líneas observadas en el espectro del átomo de hidrógeno e iones simples (He^{+}, Li^{2+}, etcétera). La idea de valores cuantizados de momento angular fue más tarde explicada por la naturaleza ondulatoria del electrón. Cada órbita ha de tener un número entero de longitudes de onda en torno a la misma; esto es, $n\lambda = 2\pi r$, donde λ corresponde a la longitud de onda y n un número entero. La longitud de onda de una partícula viene dada por h/mv, de suerte que $nh/mv = 2\pi r$, que conduce a $mvr = nh/2\pi$. La teoría atómica moderna no permite que las partículas subatómicas sean tratadas de la misma forma que los objetos grandes, lo que ha dejado desacreditado hasta cierto punto el razonamiento de Bohr. Persiste, sin embargo, la idea de momento angular cuántico.

El trabajo adquirió una doble importancia en la historia de la física del siglo XX. Por un lado, representaba el primer esbozo de una teoría coherente sobre la constitución del átomo; por otro, se convertía en un avance decisivo de la concepción cuántica al establecer su alto nivel de generalidad. Hasta 1910, la mayoría de los físicos (con la excepción de Einstein, Von Laue y Ehrenfest) estaban convencidos de que la constante de Planck h era característica solo de la radiación del calor. Por ese hito Bohr recibió en 1922 el premio Nobel. Bohr explicaba también la tabla periódica en términos de

capas de electrones y desarrolló el modelo de gota líquida del núcleo.

Bohr asignó al principio de correspondencia un puesto central en su teoría. Fue, sobre todo, un instrumento técnico. Derivaba de su profundo convencimiento de la correspondencia entre la física cuántica y la física clásica. El primer trabajo donde empleó el concepto de correspondencia fue en «On the quantum theory of line-spectra. Part I», publicado en 1918. Volvió sobre el asunto en 1920, para culminarlo en 1921. La teoría de los osciladores virtuales, de 1924, constituye un ejemplo de dicho principio. Hasta 1925 no se mostró preocupado ni por la dualidad partícula-onda ni por la dualidad continuidad-discontinuidad. Andaba enfrascado en la incoherencia aparente entre la teoría cuántica, que implica una emisión o absorción discontinuas de radiación, y la teoría electromagnética, que implica una emisión y absorción continuas.

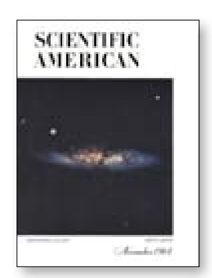
Bohr se había empeñado en elaborar un programa propio de investigación sobre la expansión del conocimiento de los fenómenos atómicos y, al propio tiempo, de revisión de los fundamentos de la física. Ese programa perduró hasta 1927, cuando Bohr aportó su interpretación física de la mecánica cuántica basada en el principio de complementariedad. En 1927, propone la complementariedad de las representaciones de los sucesos porque en el lenguaje ordinario podemos explicar la totalidad de la naturaleza a través de un modo de descripción complementario. Para él, la teoría cuántica es una generalización racional de la mecánica clásica. En sus palabras, sacadas de *Atomic theory and the description of nature* (1929): «El esfuerzo empeñado en formular leyes generales para estas posibilidades y probabilidades mediante la aplicación debidamente limitada de los conceptos de las teorías clásicas ha conducido recientemente, tras una serie de fases en su desarrollo, a la creación de una mecánica cuántica racional por medio de la cual somos capaces de describir experiencias muy dispares y que puede considerarse en todos sus aspectos una generalización de las teorías físicas clásicas».

Esa tesis resulta necesaria para comprender la postura de Bohr en física cuántica: su visión sobre la complementariedad, el principio de correspondencia y la indispensabilidad de los conceptos clásicos. Aunque Bohr consideraba que el cuanto de acción de Planck desembocaba en una exigencia de revisión de la física, fue más un teórico de la continuidad que un revolucionario. Un teórico de la continuidad en el sentido de que él intentó mantener y subrayar los rasgos de la teoría predecesora que se conservaban en la transición a la teoría sucesora.

El nombre de Bohr va indisociablemente unido a la interpretación de Copenhague. Por tal se entiende la interpretación canónica de la mecánica cuántica en la que un sistema (por ejemplo, una partícula) puede describirse mediante una función de onda. Esta es una función compleja; su significado físico es que el cuadrado del módulo de la función de onda es proporcional a la probabilidad de un estado definido particular. En la interpretación de Copenhague, una partícula no tiene una posición definida o espín hasta que es observada, es decir, hasta que se realiza una medición. La idea es que la medición «colapsa la función de onda», conduciendo a una medición definitiva del estado. Sin embargo, cualquier predicción del estado de un sistema puede ser solo probabilista. La interpretación de Copenhague es la más aceptada por los físicos, pero no se halla exenta de paradojas.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Noviembre 1964

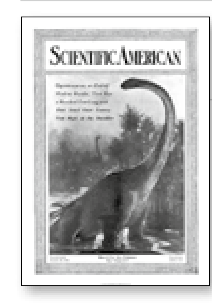
La proteína hemoglobina

«Por su comportamiento, la hemoglobina se asemeja más a un pulmón molecular que a un tanque de oxígeno. Dos de sus cuatro cadenas se desplazan en uno y otro sentido, de tal modo que la separación entre ellas se estrecha cuando el oxígeno se une a la proteína, y se ensancha cuando este se libera. Ya antes se había descubierto que la actividad química de la hemoglobina y otras proteínas viene acompañada de cambios estructurales, pero por primera vez se ha puesto de manifiesto la naturaleza de tales cambios. Las variaciones en la forma de la hemoglobina hacen que me la imagine cual una molécula que respirase, aunque, paradójicamente, se expanda no cuando toma oxígeno, sino cuando lo expele.
—M. F. Perutz»

Perutz compartió el premio Nobel de química de 1962 por este trabajo.

Burbujas nutritivas

«Se ha descubierto que las burbujas que crean las olas marinas contribuyen de modo esencial a la cadena trófica oceánica. A la película líquida que circunda al aire interior de la burbuja se adhieren grandes cantidades de moléculas procedentes de la inmensa reserva de sustancias orgánicas disueltas en el agua del mar. En el proceso forman unos diminutos grumos de materia orgánica que son ingeridos por los miembros más pequeños de la población marina. El descubrimiento de este nuevo mecanismo de producción alimentaria tiene su origen en la disconformidad de algunos biólogos marinos con la idea tradicional sobre la pirámide de la vida oceánica. Se destacó que la cantidad de materia orgánica disuelta o en suspensión en los océanos es por lo menos cincuenta veces superior a la que representa la totalidad del plancton vivo.»



Noviembre 1914

Heridos de guerra

«Se ha comprobado que las heridas debidas a las modernas balas de alta velocidad, revestidas con camisa de níquel, son más o menos asépticas, y que una gran proporción de ellas no son de naturaleza grave y no causan sino problemas poco importantes. En este sentido, el trabajo de los cirujanos militares sin duda se ha simplificado, y el porcentaje de bajas mortales por herida de bala experimentará en esta guerra una disminución importante (*véase la fotografía*).»



CORACEROS (soldados de caballería pesada) del ejército francés fotografiados mientras auxilian a un camarada herido, 1914.

FOTOGRAFÍA DE MEURISSE EN *SCIENTIFIC AMERICAN SUPPLEMENT*, VOL. LXXVIII, N.º 2029, 21 DE NOVIEMBRE DE 1914

Agua para el transporte

«Uno de los grandes problemas industriales de la época es el transporte de materias primas. En el caso de los troncos de madera, estos muchas veces se talan en puntos muy elevados de una ladera montañosa, o en un pantano o en lugares muy distantes del aserradero. Movido sin duda por tales consideraciones, el capitán H. R. Robertson acometió hace treinta años, en Nueva Escocia, la empresa de construir balsas de troncos y luego llevarlas hasta Nueva York mediante remolcadores. El capitán Robertson ha trasladado ahora su actividad a Coal Creek. Aquí se siguen construyendo balsas que luego se envían flotando hasta el mar por el río Columbia. De ahí se remolcan costeando hasta San Francisco, un trayecto de 500 o 600 millas marinas. El material que se transporta por este procedimiento se compone únicamente de maderos aptos para pilares.»



Noviembre 1864

Elecciones presidenciales

«Abraham Lincoln, de Illinois, ha sido reelegido presidente de los Estados Unidos por una amplia mayoría del pueblo; y Andrew Johnson, de Tennessee, ha sido elegido vicepresidente para suceder a Hannibal Hamlin, de Maine. La jornada electoral transcurrió pacíficamente y sin necesidad de intervención militar; ahora los ciudadanos de todos los partidos deben prestar una obediencia leal y bien dispuesta a las autoridades así constituidas merced a los votos del pueblo. Bajo nuestro Gobierno constitucional, esa obediencia es absolutamente necesaria para la seguridad y la prosperidad ininterrumpidas de la República; pues esta resultará destruida si el Gobierno no es respaldado por la fortaleza del pueblo unido; el orden cederá ante la anarquía y a esta seguirá un poder despótico apoyado por la fuerza militar y la violencia. Ya hemos presenciado las tremendas consecuencias de una rebelión contra los gobernantes legítimamente elegidos de este país, rebelión cuyos tristes efectos perdurarán al menos durante una generación.»



BIOLOGÍA

El poder de la mecánica celular

Stefano Piccolo

Las fuerzas mecánicas que actúan sobre una célula pueden determinar si esta formará parte de un hueso, del cerebro o de un tumor. No todo está en los genes.





HISTORIA DE LA CIENCIA

El caso contra Copérnico

Dennis Danielson y Christopher M. Graney

La oposición a la revolucionaria idea copernicana de que la Tierra gira alrededor del Sol no provino tan solo de las autoridades religiosas. Las pruebas respaldaban una cosmología diferente.

QUÍMICA

Nanomateriales a la carta

Beatriz Hernández Juárez y Luis M. Liz Marzán

Un fino control del tamaño y la forma de las nanopartículas permite obtener materiales con nuevas propiedades ópticas y electrónicas.



INFORME ESPECIAL
ESTADO DE LA CIENCIA GLOBAL 2014

El valor de la diversidad en la investigación científica

VV.AA.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes*, *Una diferencia mínima, pero notable*, *Ventajas evolutivas de la monogamia*, *Raíces del espíritu cooperativo y El futuro de la evolución humana*; Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Carlos Lorenzo: *Reescribir la evolución y Nuestro intrincado árbol genealógico*; Fabio Teixidó: *Cambios climáticos y evolución humana*; Alejandro Bonmatí: *A golpe de suerte*; Marián Beltrán: *La pequeña gran diferencia y El primate interconectado*; Alfredo Marcos: *Ciencia y sentido común ¿adversarios o aliados?*; Claudi Mans: *Creación de una polimeroteca*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España


Emidio Tucci®
FASHIONFILM
#estrenaotoño
elcorteingles.es
SOLO EN El Corte Inglés